



Gonçalo José Domingos Damião Lopes

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

Análise dos mecanismos de capilaridade em corpos porosos

Dissertação para obtenção do Grau Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Professor Doutor Fernando M. A. Henriques

Júri:

Presidente:	Professora Doutora Maria Paulina Santos Forte de Faria Rodrigues
Arguente:	Professor Doutor Vasco Nunes da Ponte Moreira Rato
Vogal:	Professor Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques



**FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

Novembro de 2014

O presente trabalho foi suportado por fundos COMPETE na sua componente FEDER e pelo orçamento da FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, sob o projecto de investigação PTDC/ECM-COM/3080/2012

Análise dos mecanismos de capilaridade em corpos porosos

‘Copyright’ Gonçalo José Domingos Damião Lopes, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Professor Doutor Fernando Henriques, orientador científico da presente dissertação, pela disponibilidade a qualquer hora do dia, por todos os conhecimentos transmitidos e pela cordialidade sempre presente na relação professor-aluno.

Ao Engenheiro Vítor Silva agradeço por todo o apoio nas actividades laboratoriais, bem como, por todas as discussões construtivas que permitiram melhorar este trabalho.

Agradeço á minha colega Carla Veiga, por todo o apoio sem o qual todo este trabalho e ensaios, teriam sido impossíveis em tempo útil.

Em especial, agradeço aos meus pais e irmão que tornaram possível este percurso, que embora longe, tenham estado sempre presentes para apoiar quer nas melhores quer nas piores alturas. Porque esta dissertação não resulta apenas de um semestre mas sim de um percurso académico de vários anos com altos e baixos.

Resumo

Na sua grande maioria os materiais correntes de construção são porosos e, como tal, susceptíveis à ascensão capilar. Um dos principais elementos expostos a este fenómeno são as paredes de alvenaria que, dado o seu contacto directo com o solo, levam a que a ascensão capilar se processe de forma intermitente em função das estações do ano e do nível freático dos terrenos. Na sua constituição, têm maioritariamente pedra ou tijolo ligados por uma argamassa, podendo ou não ter uma camada de enchimento que separa dois panos de alvenaria. Dada a heterogeneidade destes elementos, o fenómeno desenrolar-se-á de uma forma diferenciada entre diferentes materiais e a zona que os separa (interface), em especial devido à grande diferença de porometria dos materiais. Para além deste ponto, o fluxo pode ser interrompido ou alterado por um elemento que constitui a parede, alternando a forma como a humidade absorvida.

No âmbito deste trabalho, recolheram-se amostras de materiais utilizados nas paredes de alvenaria em Portugal, nomeadamente o calcário, o granito e o tijolo bem como materiais granulares que fazem o enchimento entre dois panos de alvenaria.

Para conhecer a estrutura porosa dos materiais ensaiados, realizaram-se ensaios de porometria com recurso ao porosímetro de mercúrio e foi feita a caracterização dos materiais com base no método gravimétrico que combinados com os ensaios de absorção capilar em diferentes disposições, o que permitiu conhecer de que forma a combinação de materiais com diferentes gamas de poros afecta o comportamento capilar. Foi, ainda, realizada uma análise da ascensão capilar em amostras com diferentes teores de água iniciais.

A conjugação de todos os resultados permitiu constatar que o tipo de interface entre corpos porosos não tem influência na ascensão capilar e que variações na absorção capilar a partir desta zona são resultado da diferença de porometrias sendo as condicionantes apresentadas na presente dissertação.

Termos chave: Alvenaria, capilaridade, interface, porosidade, porosimetria de mercúrio, porometria

Abstract

In their majority, the current construction materials are porous and therefore, susceptible to the capillary rise. One of the principal elements exposed to this phenomena are the masonry walls that given their direct contact with the soil make that the capillary rise occurs in an intermittent way in function of the seasons, and the phreatic level of the soil. In their constitution they mainly have stone or bricks connected by a mortar, and can have, or not, a layer that separates the two masonry layers. Given the heterogeneity of those elements, the phenomena unfold in a different way between the materials and the zone that separates them (interface), especially because of the big difference of porometry of the materials. Besides, the flow can be interrupted or changed by elements that make part of the wall, changing the way that the moisture is absorbed.

In the scope of this work, samples were collected from materials used in masonry walls in Portugal, namely, limestone, granite, brick, as well as granular materials that fill the space between two masonry layers.

To understand the porous structure of the collected materials, were performed porometry tests with the mercury porosimeter and characterization of the materials based in the gravimetric method, that combined with the capillary assays in different dispositions, allowing to know in which way, the combinations of materials with different pore combinations, affects the capillary behaviour. It was further performed an analysis of the capillary rise in samples with different initial water contents.

The conjunction of all those results allowed to understand that the kind of interface between porous bodies didn't influence the capillary rise and variations in the capillary absorption starting this zone are result of the difference of porometries being the conditionants presented in the present dissertation.

Keywords: Masonry, Capillarity, Interface, Porosity, Mercury porosimetry, porometry

Índice de Texto

1	Introdução	1
1.1	Considerações gerais	1
1.2	Objectivo e metodologia.....	1
1.3	Estrutura da dissertação	1
2	Evolução da alvenaria	3
2.1	Paredes de alvenaria	4
2.1.1	Paredes de alvenaria com junta seca.....	4
2.1.2	Paredes com junta argamassada	5
2.1.3	Paredes de Alvenaria Mista	5
2.1.3.1	Alvenaria mista de tijolo e Pedra	5
2.1.3.2	Alvenaria mista de pedra ou tijolo e armação de madeira.....	6
2.2	Sistemas construtivos	7
2.2.1	Paredes de pano simples	7
2.2.2	Paredes de dois panos sem ligação	8
2.2.3	Parede de dois panos com perpianhos	8
2.2.4	Paredes de três panos.....	9
3	Princípios do comportamento capilar	11
3.1	Capilaridade	11
3.2	Evolução capilar.....	14
3.2.1	Forças capilares.....	14
3.2.2	Modelos da evolução capilar	15
3.3	Fluxo horizontal de água.....	17
3.4	Migração após a interrupção do contacto de água.....	18
3.5	Interface	19
3.5.1	Tipos de interface entre materiais.....	19
3.5.2	Influência dos diferentes tipos de interface no fenómeno da capilaridade.....	20
4	Estrutura porosa	21
4.1	Porosidade	21
4.1.1	Características macroscópicas	21
4.1.2	Características microscópicas	22
4.2	Modelos para a caracterização dos poros	23
4.3	Métodos para a caracterização da estrutura porosa	24
4.3.1	Método gravimétrico	24
4.3.2	Microscópio óptico	25
4.3.3	Microscópio electrónico de varrimento (SEM)	25
4.3.4	Porosimetria de mercúrio (MIP)	25

4.3.5	Adsorção de nitrogénio	26
4.4	Relações entre porosidade e capilaridade.....	26
4.5	Porometria após absorção de água.....	27
5	Análise experimental.....	29
5.1	Materiais ensaiados	29
5.2	Método de extração das amostras do enchimento de paredes.....	31
5.3	Preparação dos provetes de pedra e de tijolo	35
5.4	Argamassas	37
5.5	Traço das argamassas.....	37
5.5.1	Argamassa de cal aérea	38
5.5.2	Argamassa de cal hidráulica.....	38
5.6	Amassadura	38
5.7	Preparação dos provetes de argamassa	39
5.8	Execução de provetes mistos de argamassa / outros	40
5.9	Carbonatação acelerada.....	42
5.10	Porosimetria de mercúrio (MIP)	42
5.11	Massa volúmica e porosidade	43
5.12	Ensaio de capilaridade	44
5.12.1	Ensaio de capilaridade em material de enchimento de paredes.....	46
5.12.2	Ensaio de capilaridade com sentido horizontal.....	47
5.12.3	Ensaio de ciclos de absorção por capilaridade para diferentes teores de água	48
5.12.4	Ensaio Mistos de interface simples.....	49
6	Análise e discussão de resultados.....	51
6.1	Ensaio de porosidade.....	51
6.2	Ensaio de porometria com recurso ao MIP	52
6.2.1	Intrusão incremental de mercúrio	52
6.2.2	Curvas de intrusão e extrusão cumulativa de mercúrio.....	54
6.3	Ensaio de capilaridade	56
6.3.1	Pedras e tijolo	56
6.3.2	Argamassas	61
6.3.3	Ensaio de capilaridade sobre material de enchimento de paredes	63
6.4	Ensaio de capilaridade em provetes mistos.....	66
6.4.1	Ensaio de capilaridade sobre provetes mistos com argamassa de cal aérea.....	66
6.4.1.1	Ensaio mistos com o meio inferior em argamassa de cal aérea	66
6.4.1.2	Ensaio mistos com o meio inferior em pedra ou tijolo	68
6.4.2	Ensaio de capilaridade sobre provetes mistos com argamassa de cal hidráulica	73
6.4.2.1	Ensaio mistos com o meio inferior em argamassa de cal hidráulica.....	74
6.4.2.2	Ensaio mistos com o meio inferior em pedra ou tijolo	76
6.4.3	Discussão dos ensaios de capilaridade sobre provetes mistos	80

6.5	Ensaio de capilaridade mistos com interface simples	83
6.5.1	Capilaridade com o meio saturado de argamassa	84
6.5.2	Capilaridade com materiais idênticos	86
6.5.3	Discussão dos ensaios de capilaridade com interface simples.....	87
6.6	Ensaio de capilaridade em sentido horizontal	88
6.6.1	Discussão dos ensaios de capilaridade em sentido horizontal	89
6.7	Ensaio de ciclos de absorção de água por capilaridade para diferentes teores de água	91
6.7.1	Discussão dos ensaios de ciclos de absorção de água por capilaridade para diferentes teores de água.....	92
7	Conclusões e propostas para desenvolvimentos futuros	95
7.1	Conclusões	95
7.2	Propostas para desenvolvimentos futuros.....	96
	Bibliografia	97

Índice de Figuras

Figura 2.1: Aparelhos de pedra [32].....	4
Figura 2.2: paredes de alvenaria mista de pedra e tijolo [54]	6
Figura 2.3: Paredes de alvenaria mista pedra ou tijolo com armação em madeira [42].....	6
Figura 2.4: Parede de alvenaria de pano simples [43].....	7
Figura 2.5: a) Parede de alvenaria de dois panos com junta argamassada, b) parede de alvenaria de dois panos com junta seca	8
Figura 2.6: Parede dois panos com perpianhos	9
Figura 2.7: Parede de três panos	10
Figura 3.1: Ângulos de contacto de um líquido numa superfície (adaptado de [40]).....	12
Figura 3.2: Resultante vertical de ascensão capilar	12
Figura 3.3: Tubos capilares (adaptado de [25])	13
Figura 3.4: Efeito da inércia na ascensão capilar (Adaptado de [16])	17
Figura 3.5: Tipos de interface [15].....	19
Figura 4.1: Ligações em meios porosos [9]	23
Figura 4.2: Curvas de intrusão e extrusão de mercúrio para os diferentes tipos de poros ([4] adaptado de [3])	24
Figura 5.1: Calcário amarelo e calcário branco.....	30
Figura 5.2: Tijolo maciço	30
Figura 5.3: Granito.....	31
Figura 5.4: Método para a extracção de amostras de enchimento de paredes.....	32
Figura 5.5: Parede de alvenaria em Almada de onde se extraiu o enchimento	33
Figura 5.6: Pormenor de parede em Costas do cão de onde se extraiu o material de enchimento.....	33
Figura 5.7: Extracção de amostras numa parede em Castelo Branco	34
Figura 5.8: Extracção de amostras numa parede de taipa em Portimão.....	34
Figura 5.9: Ruínas de onde foram extraídas amostras de Alvaiázere cal a) e de onde se extraíram as amostras de Alvaiázere terra b).....	35
Figura 5.10: Aspecto final dos provetes após o corte	36
Figura 5.11: Escovagem das superfícies de contacto dos provetes	36
Figura 5.12 Curvas granulométricas das areias utilizadas no fabrico de argamassas.....	37
Figura 5.13: Pesagem a) e uniformização b) dos agregados e ligante para a argamassa	39
Figura 5.14: Amassadura da argamassa	39
Figura 5.15: Enchimento dos moldes no compactador mecânico	40
Figura 5.16: Aspecto final dos provetes no molde após alisamento.....	40
Figura 5.17: Preparação dos moldes para os provetes mistos.....	41
Figura 5.18: a) aspecto final dos provetes mistos de granito e argamassa de cal aérea, após alisamento b) aspecto final dos provetes mistos de tijolo e argamassa de cal aérea, após alisamento.....	41
Figura 5.19: Sistema de vácuo.....	43
Figura 5.20: Sistema para pesagem hidrostática.....	44

Figura 5.21: Sistema de ensaio para ensaios de capilaridade	45
Figura 5.22: Ensaio de capilaridade em material de enchimento de paredes	47
Figura 5.23: Esquema do fluxo de água nos provetes mistos horizontais.....	48
Figura 5.24: Ensaio de capilaridade com encosto das faces dos provetes	50
Figura 6.1: Curvas de intrusão incremental de mercúrio do granito e dos calcários	52
Figura 6.2: Curva de intrusão incremental de mercúrio do Tijolo	53
Figura 6.3: Curvas de intrusão incremental de mercúrio das argamassas de cal aérea e de cal hidráulica.....	53
Figura 6.4: Curvas de intrusão incremental de mercúrio do material de enchimento de paredes	54
Figura 6.5: Curvas de intrusão e extrusão cumulativa de mercúrio do granito.....	54
Figura 6.6: Curvas de intrusão e extrusão cumulativa de mercúrio do calcário amarelo	55
Figura 6.7: Curvas de intrusão e extrusão cumulativa de mercúrio da argamassa de cal aérea	55
Figura 6.8: Curvas de intrusão e extrusão cumulativa de mercúrio da argamassa de cal hidráulica...	55
Figura 6.9: Curvas de intrusão e extrusão cumulativa de mercúrio do tijolo	56
Figura 6.10: Ensaio de absorção capilar nas amostras de calcário amarelo e calcário branco (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo).....	57
Figura 6.11: Ensaio de absorção capilar nas amostras de calcário amarelo e calcário branco (avanço da coluna de água em função do tempo)	57
Figura 6.12: Ensaio de absorção capilar nas amostras de Tijolo (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo).....	58
Figura 6.13: Ensaio de absorção capilar nas amostras de Tijolo (avanço da coluna de água em função do tempo)	58
Figura 6.14: Ensaio de absorção capilar nas amostras de granito (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo).....	59
Figura 6.15: Ensaio de absorção capilar nas amostras de granito (avanço da coluna de água em função do tempo)	59
Figura 6.16: Ensaio de absorção capilar nas amostras das pedras e do tijolo (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo).....	60
Figura 6.17: Ensaio de absorção capilar nas amostras das pedras e do tijolo (avanço da coluna de água em função do tempo)	60
Figura 6.18: Ensaio de absorção capilar nas amostras de argamassa de cal aérea e cal hidráulica (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo).....	61
Figura 6.19: Ensaio de absorção capilar nas amostras de argamassa de cal aérea e cal hidráulica (avanço da coluna de água em função do tempo)	62
Figura 6.20: Ensaio de absorção capilar nas amostras do material de enchimento de paredes de Alvaiázere (cal) e Costas do Cão	63
Figura 6.21: Ensaio de absorção capilar nas amostras do material de enchimento de paredes de Portimão e Castelo Branco	64
Figura 6.22: Ensaio de absorção capilar nas amostras do material de enchimento de paredes de Almada e Alvaiázere (terra)	64

Figura 6.23: Ensaio de absorção capilar nas amostras do material de enchimento de paredes	65
Figura 6.24: Curvas de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior em argamassa de cal aérea e superior de calcário amarelo e dos materiais em separado (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo).....	67
Figura 6.25: Curvas de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior em argamassa de cal aérea e superior de calcário amarelo e dos materiais em separado (avanço da coluna de água em função do tempo).....	67
Figura 6.26: Curva de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior em argamassa de cal aérea e superior de tijolo e dos materiais em separado (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo).....	68
Figura 6.27: Curva de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior em argamassa de cal aérea e superior de tijolo e dos materiais em separado (avanço da coluna de água em função do tempo).....	68
Figura 6.28: a) Curva de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de calcário amarelo e superior de argamassa de cal aérea e do calcário amarelo b) Curva de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de calcário amarelo e superior de argamassa de cal aérea e do calcário amarelo com a curva da argamassa de cal aérea (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo).....	69
Figura 6.29: a) Curva de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de calcário amarelo e superior de argamassa de cal aérea e do calcário amarelo b) Curva de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de calcário amarelo e superior de argamassa de cal aérea e do calcário amarelo com a curva da argamassa de cal aérea (avanço da coluna de água em função do tempo).....	70
Figura 6.30: Curva de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior em tijolo e superior de argamassa de cal aérea e dos materiais em separado (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo).....	71
Figura 6.31: Curva de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior em tijolo e superior de argamassa de cal aérea e dos materiais em separado (avanço da coluna de água em função do tempo).....	71
Figura 6.32: a) Curva de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de granito e superior de argamassa de cal aérea e do granito b) Curva de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de granito e superior de argamassa de cal aérea e do granito com a curva da argamassa de cal aérea (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo).....	72
Figura 6.33: a) Curva de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de granito e superior de argamassa de cal aérea e do granito b) Curva de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de granito e superior de argamassa de cal aérea e do granito com a curva da argamassa de cal aérea (avanço da coluna de água em função do tempo)	73

Figura 6.34: Curvas de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de argamassa de cal hidráulica e superior de calcário amarelo e dos materiais em separado (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo).....	74
Figura 6.35: Curvas de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de argamassa de cal hidráulica e superior de calcário amarelo e dos materiais em separado (avanço da coluna de água em função do tempo).....	75
Figura 6.36: Curvas de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de argamassa de cal hidráulica e superior de tijolo e dos materiais em separado (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo).....	75
Figura 6.37: Curvas de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de argamassa de cal hidráulica e superior de tijolo e dos materiais em separado (avanço da coluna de água em função do tempo).....	76
Figura 6.38: Curvas de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de calcário amarelo e superior de argamassa de cal hidráulica e do calcário amarelo (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo)	77
Figura 6.39: Curvas de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de calcário amarelo e superior de argamassa de cal hidráulica e do calcário amarelo (avanço da coluna de água em)	77
Figura 6.40: Curvas de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de tijolo e superior de argamassa de cal hidráulica e dos materiais em separado (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo).....	78
Figura 6.41: Curvas de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de tijolo e superior de argamassa de cal hidráulica e dos materiais em separado (evolução da coluna de água em função do tempo).....	78
Figura 6.42: a) Curvas de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de granito e superior de argamassa de cal hidráulica e do granito b) Curvas de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de granito e superior de argamassa de cal hidráulica e do granito com a curva da argamassa de cal hidráulica (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo).....	79
Figura 6.43: Curvas de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de granito e superior de argamassa de cal hidráulica e do granito com a curva da argamassa de cal hidráulica (evolução da coluna de água em função do tempo)	80
Figura 6.44: Curvas de intrusão incremental de mercúrio do tijolo e das argamassas de cal aérea e cal hidráulica	81
Figura 6.45: Curvas de intrusão incremental de mercúrio do granito e das argamassas de cal aérea e cal hidráulica	82
Figura 6.46: Curvas de intrusão incremental de mercúrio do tijolo e das argamassas de cal aérea e cal hidráulica	82
Figura 6.47: Linha de água no interface entre os provetes.....	83

Figura 6.48: Curvas de absorção capilar de provetes mistos com interface simples com meio saturado de argamassa de cal aérea e seco de calcário amarelo e de provetes mistos com meio inferior em argamassa de cal aérea e calcário amarelo (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo).....	84
Figura 6.49: Curvas de absorção capilar de provetes mistos com interface simples com meio saturado de argamassa de cal aérea e seco de calcário amarelo e de provetes mistos com meio inferior em argamassa de cal aérea e calcário amarelo (evolução da coluna de água em função do tempo).....	85
Figura 6.50: Curvas de absorção capilar em provetes mistos de interface simples com meio saturado de argamassa de cal aérea e seco de tijolo e de provetes mistos com meio inferior em argamassa de cal aérea e tijolo (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo).....	85
Figura 6.51: Curvas de absorção capilar em provetes mistos de interface simples com meio saturado de argamassa de cal aérea e seco de tijolo e de provetes mistos com meio inferior em argamassa de cal aérea e tijolo (evolução da coluna de água em função do tempo)	86
Figura 6.52: Curvas de absorção capilar em provetes mistos com interface simples com materiais idênticos de argamassa de tijolo e de provetes mistos com o meio inferior em tijolo e argamassa de cal aérea (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo)	86
Figura 6.53: Curvas de absorção capilar em provetes mistos com interface simples com materiais idênticos de argamassa de tijolo e de provetes mistos com o meio inferior em tijolo e argamassa de cal aérea (evolução da coluna de água em função do tempo)	87
Figura 6.54: Curvas de absorção capilar dos ensaios de capilaridade horizontais do calcário amarelo, dos ensaios mistos com meio inferior em argamassa e calcário amarelo e da argamassa de cal aérea	88
Figura 6.55: Curvas de absorção capilar de ensaios de capilaridade horizontais de granito e dos materiais em separado	89
Figura 6.56: a) provetes de ensaio de absorção capilar do material isoladamente, b) provete dos ensaios mistos com o meio inferior em argamassa c) provete de ensaios de capilaridade em sentido horizontal.....	90
Figura 6.57: ensaios de capilaridade do granito e do calcário amarelo em sentido horizontal e ensaios isoladamente	91
Figura 6.58: Curvas de absorção capilar do calcário amarelo para diferentes teores de água	91
Figura 6.59: Curvas de absorção capilar do tijolo para diferentes teores de água.....	92
Figura 6.60: Alternância de camadas de ar e de água num capilar após ciclos de fornecimento e cessação de água.....	93
Figura 6.61: Capilares com bolsas de ar-água e capilar sem bolsas de água e ar-água.....	93

Índice de Tabelas

Tabela 4.1: Classificação da dimensão dos poros.....	24
Tabela 5.1: Dimensão para o corte dos provetes	36
Tabela 5.2: Baridade das areias utilizadas no fabrico de argamassas.....	37
Tabela 5.3: Dosagem para argamassa de cal aérea	38
Tabela 5.4: Dosagem para a argamassa de cal hidráulica	38
Tabela 5.5: Teor de água dos ensaios de ciclos de absorção capilar para diferentes teores de água	49
Tabela 6.1: Porosidade aberta obtida pelo MIP e pelo método de pesagem hidrostática	51
Tabela 6.2: Coeficientes de absorção capilar das pedras e do tijolo	61
Tabela 6.3: Coeficientes de absorção capilar das argamassas.....	62
Tabela 6.4: Coeficientes de absorção capilar do material de enchimento de paredes	65
Tabela 6.5: Sorptividade dos materiais no ensaio de capilaridade em sentido horizontal	90

1 Introdução

1.1 Considerações gerais

Quando um material poroso é posto em contacto com água, esta migra pelo material ocupando os espaços vazios aos quais pode aceder, dependendo esta evolução da forma, dimensão, e conectividade dos poros. Dada a heterogeneidade da maioria dos materiais porosos, a complexidade dos fenómenos de capilaridade é consideravelmente elevada, não se podendo antever um comportamento específico para cada caso. Tal, deve-se não só à grande variação que pode existir nos diâmetros dos poros de diferentes materiais, como também pela zona de contacto que separa dois materiais diferentes caso estes sejam postos em contacto entre si. Este trabalho surge por forma a conseguir compreender de que forma a água ascende pelos materiais porosos e quais os factores que a condicionam. A dificuldade é, como já referida, o facto dos elementos construtivos na sua grande maioria não serem homogéneos e poderem apresentar no caso dos edifícios de pedra e de grande porte, um enchimento interior do qual pouco se sabe.

1.2 Objectivo e metodologia

O principal objectivo desta dissertação é o estudo dos mecanismos de capilaridade em corpos porosos, o que compreende o estudo da influência da porometria dos materiais no fenómeno da capilaridade e ainda o estudo da capilaridade no interface entre diferentes materiais. Adicionalmente foi estudada a forma como os diferentes graus de saturação do material podem afectar a migração de água. Para à obtenção de resultados, foram realizados ensaios de capilaridade em diferentes condições de saturação, com alternância do tipo de interface, assim como do sentido de migração da água.

O interface foi conseguido com a produção de provetes, combinando-se argamassa produzida em laboratório com diferentes tipos de materiais que constituem as alvenarias características de Portugal. Posteriormente, produziram-se provetes individuais com o interface garantido apenas pelo contacto entre as faces dos diferentes materiais. Como o fluxo de água não tem sempre um sentido unidirecional, o sentido da migração foi estudado quer na horizontal, quer na vertical.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está dividida em 6 capítulos. O segundo capítulo faz uma breve abordagem à história da construção de alvenaria, bem como uma apresentação dos tipos de alvenarias de pedra mais correntes nos edifícios em Portugal, optando-se por explicar a razão pela qual se adoptavam certas técnicas construtivas e de que forma estas afectam a ascensão capilar. O terceiro

capítulo descreve o comportamento capilar e as forças que lhes estão associadas, dentro do qual são apresentados vários modelos que descrevem o comportamento capilar. No quarto capítulo dá-se especial atenção à compreensão da estrutura porosa, criando uma analogia entre a capilaridade e a porosidade, para que deste modo se perceba como o fenómeno da capilaridade se pode interrelacionar com a estrutura porosa. O quinto capítulo descreve os materiais utilizados na presente dissertação bem como as experiências que foram realizadas.

Do capítulo 6 consta a análise e discussão dos resultados. Finalmente, no capítulo 7 apresentam-se as principais conclusões deste trabalho e são apresentadas algumas sugestões com vista a refinar os resultados obtidos na presente dissertação e abordar novas temáticas para um maior aprofundamento do tema.

2 Evolução da alvenaria

Ao longo da história humana assistiu-se a uma evolução das paredes de alvenaria, variando consoante a sua localização geográfica e o fim a que se destinavam. Pode-se afirmar que os primeiros casos de construção documentada surgiram no Egipto e na Pérsia onde se utilizavam principalmente os seguintes materiais:

Terra – Moldada à forma da parede e seca ao sol, sendo muitas vezes misturada com canas ou palha;

Blocos – Foi considerado o primeiro material pré-fabricado, feitos de terra e secos ao sol;

Madeira – Muito utilizada em zonas florestais, não só para paredes como para telhados e pisos;

Pedra – Sendo o material mais resistente era também o mais difícil de trabalhar e transportar

As primeiras alvenarias eram constituídas por um amontoado de pedras que nas juntas poderiam ter, ou não, terra funcionando como um elemento de ligação com a função de preencher os espaços vazios entre os elementos de alvenaria.

Com o passar dos anos e o desenvolvimento dos metais, foi possível desenvolver ferramentas mais resistentes que permitiam trabalhar melhor a pedra, conseguindo formar elementos poligonais que eram posteriormente ligados entre si por argamassas de cal, ou então, sem qualquer enchimento designando-se por junta seca. O facto de não haver enchimento, obrigava a trabalhar melhor a pedra, evitando o aparecimento de vazios entre elementos de alvenaria [8].

A pedra sendo um material com um elevado custo como produto final, não só pelo preço da matéria-prima como pelo custo associado à mão-de-obra, era usada no passado para realçar o nome de uma família ou um determinado edifício e quanto mais trabalhada, mais relevo este teria, sendo-lhe associado um maior custo.

Na construção de uma parede, as pedras eram escolhidas, cortadas e desbastadas de modo a que as faces expostas fossem planas e as restantes ligeiramente rugosas por forma a melhorar a aderência entre a argamassa e as pedras. A este tipo de trabalho da pedra chama-se cantaria. Na fase da construção, as pedras eram montadas por forma a desencontrar as juntas tal como é executado nas paredes de tijolo actualmente, com o objectivo de garantir um melhor comportamento estrutural.

As pedras utilizadas na construção de paredes podiam apresentar-se das seguintes formas:

- fragmentos de formas variadas e com dimensões que dependiam quer da espessura da parede quer da importância da construção;
- em blocos desbastados de modo grosseiro, com formas mais ou menos regulares;
- totalmente aparelhadas.

As peças de cantaria mais trabalhadas tais como lintéis, vergas e peitoris ficavam à vista e nos restantes elementos da parede era aplicado um reboco, geralmente de argamassa de cal aérea.

Com o passar dos anos a pedra passou a ser vista quase que como elemento ornamental, passando o tijolo a ser o principal material utilizado nas paredes de alvenaria.

2.1 Paredes de alvenaria

Consoante a idade, zona do país e o tipo de edifício, a forma de edificar as paredes foi alterando. O presente texto visa descrever os tipos de paredes mais vulgares que foram sendo realizadas em Portugal e que chegaram até nós.

2.1.1 Paredes de alvenaria com junta seca

A junta seca era um método utilizado nas civilizações mais antigas como a Grécia e Roma, sendo ainda hoje visível em pontes romanas que chegaram aos nossos dias. O seu processo construtivo consistia em utilizar pedras de grandes dimensões de granito ou xisto assentes fiada sobre fiada, preenchendo os espaços vazios com pequenas pedras para equilibrar as paredes. Havia a preocupação de se utilizarem dentro das pedras disponíveis, as que tivessem as faces mais regulares para formarem um paramento o mais plano possível [32]. As formas mais vulgares de trabalhar a pedra para paredes de alvenaria constam da figura 2.1 onde são apresentados quatro tipos, com um grau de regularidade crescente aos quais se dá o nome de aparelhos. O aparelho ciclópico é o mais básico de todos os aparelhos de pedra consistindo no assentamento de blocos sobrepostos, pouco trabalhados e de grandes dimensões. O aparelho poligonal é um aperfeiçoamento do anterior resultando em pedras com dimensões inferiores e um formato mais regular. O aparelho pelágico apresenta-se com um grau de perfeição superior e finalmente, no aparelho regular os elementos da alvenaria têm as faces e o seu formato regulares sendo de todos os aparelhos, o mais perfeito e conseqüentemente o que acarretava mais tempo de trabalho e custo.



a) Aparelho ciclópico



b) Aparelho Poligonal



c) Aparelho pelágico



d) Aparelho regular

Figura 2.1: Aparelhos de pedra [32]

2.1.2 Paredes com junta argamassada

A partir de uma determinada época, o uso da argamassa foi-se generalizando, exceptuando-se os casos mais particulares e raros em que a pedra era regularmente aparelhada e assente à face. Nas alvenarias de junta argamassada as pedras apresentam dimensões variáveis, sendo aplicadas por fiadas e utilizando uma argamassa que ao mesmo tempo que faz o enchimento dos espaços vazios, assegura a ligação entre os elementos de alvenaria. É recorrente observarem-se situações em que em vez de uma argamassa de cal era utilizada terra, em especial argila, observando-se esta tipologia em zonas onde a cal na época de construção era mais rara ou de custo elevado. Em Portugal, consoante as zonas do país a pedra utilizada variava. Na região de Lisboa e em quase toda a Extremadura, o calcário era a rocha mais utilizada na construção, já no Norte e nas Beiras era o Granito. A razão prende-se com o facto de ser a rocha predominante nos locais de construção [32]. Este tipo de alvenaria foi a mais utilizada em Portugal até meados do SEC. XIX.

2.1.3 Paredes de Alvenaria Mista

As paredes de alvenaria mista assentam no princípio construtivo básico das paredes de alvenaria com junta argamassada. Contudo, a sua construção utiliza dois ou mais materiais ligados por argamassa, sendo as combinações mais recorrentes:

- pedra e tijolo;
- pedra, tijolo e madeira.

Com esta solução construtiva, pretendia-se conciliar as vantagens de cada um dos materiais individualmente.

2.1.3.1 Alvenaria mista de tijolo e Pedra

A utilização desta combinação de materiais permite facilitar a construção de determinadas zonas dos edifícios. Por exemplo, era possível utilizarem-se blocos de pedra irregulares nas paredes resistentes e nas zonas de arcos, lintéis e abóbadas optava-se pelo uso de tijolos maciços que, devido à sua dimensão regular, tornava mais simples e rápida a sua construção. Esta técnica foi amplamente utilizada em Portugal na reconstrução da baixa pombalina, adoptando-se no R/chão dos edifícios paredes de alvenaria de pedra e os arcos e abóbadas em tijolo maciço tal como ilustrado na figura 2.2 [24].



a)



b)

Figura 2.2: paredes de alvenaria mista de pedra e tijolo [54]

2.1.3.2 Alvenaria mista de pedra ou tijolo e armação de madeira

A combinação de pedra ou de tijolo com madeira surgiu de uma forma mais intensa em Portugal após o terramoto de 1755 em Lisboa, sendo a técnica utilizada na gaiola pombalina em que uma armação em madeira era preenchida com elementos de alvenaria de pedra ou tijolo maciço ligados por uma argamassa tal como ilustrado na Figura 2.3. Esta prática só era utilizada nos pisos acima do R/chão. Tal, deve-se ao facto do terreno onde assentam as paredes se apresentar húmido na altura do Inverno e seco no Verão. Desta forma os ciclos de humedecimento e secagem conduziriam ao apodrecimento da madeira [24].

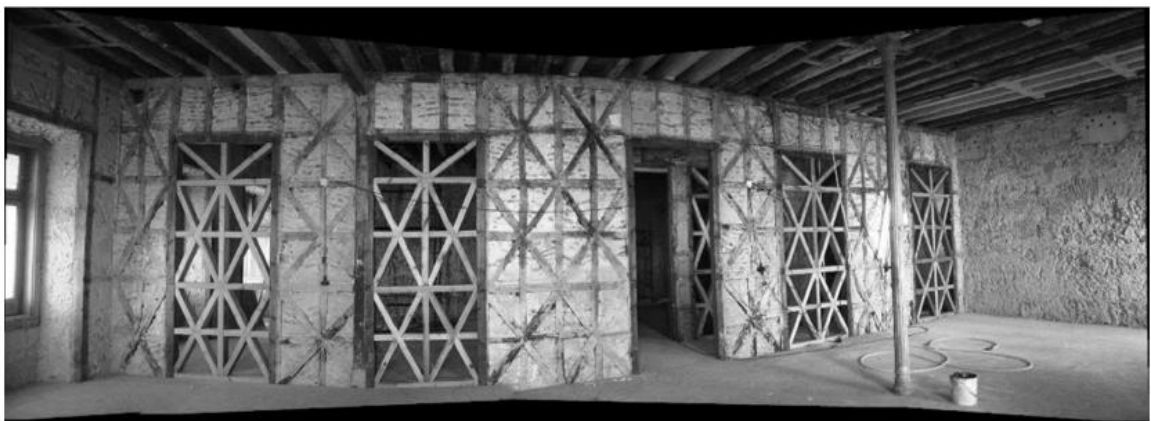


Figura 2.3: Paredes de alvenaria mista pedra ou tijolo com armação em madeira [42]

2.2 Sistemas construtivos

O presente sub-capítulo faz uma descrição dos métodos construtivos na generalidade dos casos, justificando ao mesmo tempo as soluções construtivas e de que forma estas influenciam a ascensão capilar.

A alvenaria de pedra pela sua constituição apresenta um elevado peso próprio e como se compreende, quanto mais alto o edifício, maior será a carga que as paredes têm de suportar. Deste modo, a engenharia teve a necessidade de conferir características aos edifícios que lhes permitissem suportar as cargas verticais. Sendo a tensão instalada num material resultado do quociente entre a força e a área sobre a qual esta força actua, quanto maior a força, maior deverá ser a área para uma correcta distribuição das cargas. Em suma, quanto maior a altura de um edifício, maior a carga que as paredes na base têm de suportar, resultando numa maior espessura das paredes.

2.2.1 Paredes de pano simples

Em muros ou pequenas habitações, em geral a altura é reduzida resultando numa carga vertical diminuta, não havendo portanto a necessidade de fazer uma grande distribuição das cargas ao longo de uma grande área de parede. Nestes casos, as paredes têm frequentemente espessuras na ordem dos 0,40 m [32]. Sendo denominadas por paredes de pano simples de alvenaria com junta argamassada, tal como se ilustra na Figura 2.4.



Figura 2.4: Parede de alvenaria de pano simples [43]

Era frequente em algumas zonas do país utilizar-se o xisto. Nestes casos, a parede teria uma ascensão capilar muito reduzida. Noutros casos em que se utilizavam calcários porosos ou granitos alterados, a ascensão é muito elevada. Contudo, a fina espessura das paredes permitia que houvesse uma grande evaporação e como tal a altura atingida pela água seria reduzida.

2.2.2 Paredes de dois panos sem ligação

Sempre que um edifício com um ou mais pisos, tivesse um pé direito muito elevado, era necessário distribuir as cargas e como tal fazer paredes com maior secção. Para facilitar a construção, os blocos eram aparelhados com dimensões menores e dispostos em duas filas paralelas encostadas entre si, tal como apresentado na Figura 2.5. Na sua execução, trabalhavam dois pedreiros frente a frente acompanhando as fiadas entre si, conseguindo-se uma maior rapidez de construção e ao mesmo tempo, garantia-se a planeza e a verticalidade da parede, pois os panos subiam ao mesmo tempo servindo de apoio entre si e as prumadas eram verificadas regularmente por dois pedreiros em vez de um só [32]. Estes panos podiam ser separados por um junta vertical na zona de separação que, consoante a altura do edifício e o risco de ocorrência de sismos, podia ser seca (Figura 2.5 b) ou preenchida com uma argamassa (Figura 2.5 a) com o objectivo de lhe conferir maior resistência.



d)



b)

Figura 2.5: a) Parede de alvenaria de dois panos com junta argamassada, b) parede de alvenaria de dois panos com junta seca

Relativamente ao fenómeno capilar, cada pano destas paredes, apresenta individualmente um comportamento à ascensão capilar semelhante às paredes de alvenaria de pano simples. No entanto, dada a sua maior espessura, as condições de secagem são inferiores e a existência de uma junta que poderia estar preenchida com argamassa entre os dois panos propiciava o fenómeno de ascensão capilar representando não só uma ascensão capilar mais rápida, como um aumento do teor de água, o que conjugado com as condições de secagem deficitária, levaria a uma maior altura atingida pela água face às paredes de pano simples.

2.2.3 Parede de dois panos com perpianhos

Sempre que numa parede de dois panos se queria conferir maior estabilidade, quer por se pretender aumentar a altura, quer pela função que a parede desempenhasse, era frequente

introduzirem-se pedras que atravessavam a parede fazendo a intersecção entre os dois panos. A estes elementos dá-se o nome de perpianhos e têm a função de conferir um melhor travamento às paredes, resistindo melhor desta forma às acções horizontais como se ilustra na figura 2.6.



Figura 2.6: Parede dois panos com perpianhos

A presença de perpianhos, ao mesmo tempo que aumentava a estabilidade, servia de barreira à água, especialmente, nos casos em que estes fossem feitos em pedras menos porosas, reduzindo desta forma a ascensão capilar.

2.2.4 Paredes de três panos

Na maioria dos edifícios de grande porte, as paredes eram consideravelmente espessas podendo variar entre os 0,6m e vários metros na base para suportarem as tensões instaladas. Contudo, paredes muito espessas, implicavam não só um elevado custo em mão de obra para aparelhar a pedra como também em material. Para resolver estes dois problemas, estas paredes eram construídas da seguinte forma:

Era construída uma parede de dois panos separados entre si, e à medida que a parede subia era introduzido material de enchimento na zona de separação. Essa zona, consoante a carga que tinha de suportar, tinha dimensões variáveis podendo variar de alguns centímetros a vários metros. No que toca ao material de enchimento, era diversificado, sendo quase sempre utilizados resíduos de materiais de construção das paredes e de terra que se encontrava nas imediações do edifício. Por motivos de estabilidade eram adoptados dois métodos, em primeiro lugar na construção das paredes eram introduzidos perpianhos e, independentemente da pedra que se utilizava para fazer as paredes, os cunhais eram sempre construídos em pedra de elevada qualidade [32].

A Figura 2.7 ilustra um caso de uma parede de três panos com um enchimento de material incoerente.

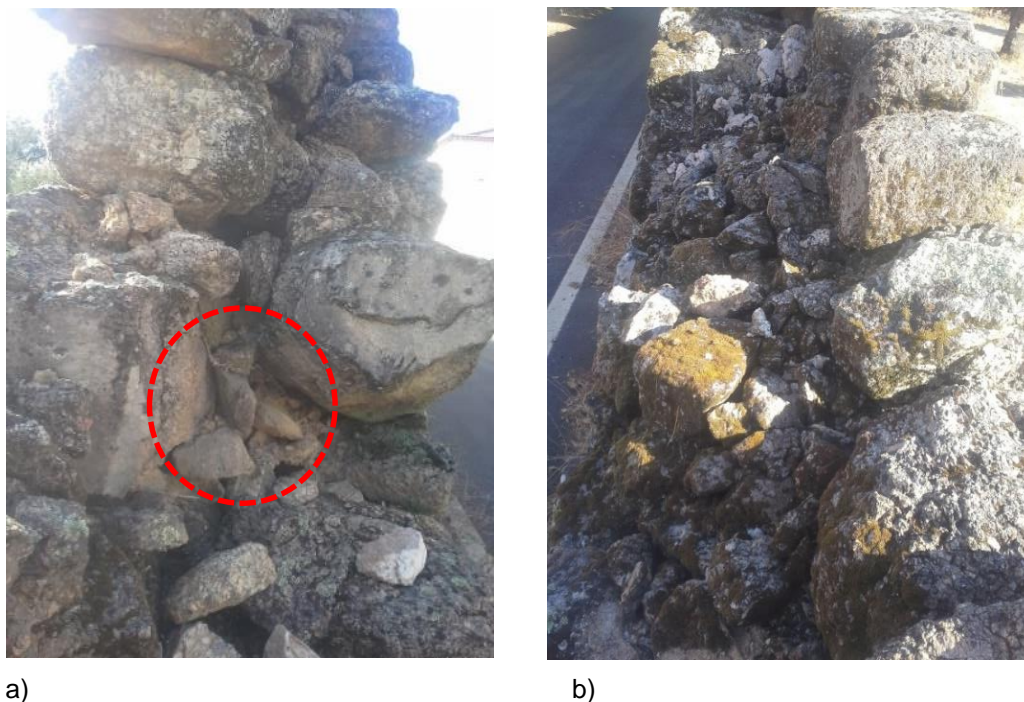


Figura 2.7: Parede de três panos

A figura 2.7 ilustra duas imagens, ambas da mesma parede, no entanto uma tirada no topo da parede figura 2.7 b) e outra numa secção em ruína figura 2.7 a). No topo da parede ainda se pode observar parte do enchimento constituído por pedras de granito de dimensões variáveis. Já na figura 2.7 a) é possível identificar a presença de terra na zona mais acastanhada, marcada com uma circunferência tracejada a vermelho. Assim, nesta parede o enchimento foi feito com terra e com os restos que sobravam do próprio trabalho de aparelhar a pedra. Uma análise mais atenta permite ainda constatar que a parede aumenta a sua secção desde o topo até a base coerente com as afirmações atrás proferidas.

Este tipo de paredes tem um comportamento face à ascensão capilar mais complexo, envolvendo todos os fenómenos que se dão numa parede de dois panos com perpianhos, com a agravante de, no seu interior ter um material granular cuja constituição é na sua grande maioria desconhecido. Desta forma, o comportamento da parede será em certa forma também ele incerto, dependendo em grande parte do material de enchimento da parede. Se este tiver um elevado coeficiente de absorção capilar, ainda que os dois panos não o tenham, dar-se-á um humedecimento das paredes até uma altura considerável que poderá chegar a vários metros.

3 Princípios do comportamento capilar

3.1 Capilaridade

O comportamento capilar está presente em grande parte dos fenómenos que envolvam o contacto de líquidos com corpos porosos. Para simplificação e compreensão considere-se o líquido água e o corpo poroso uma argamassa. Ao colocar-se um provete de argamassa em contacto com uma linha de água, esta ascende pelo material até uma determinada altura dando-se a este fenómeno o nome de ascensão capilar. Ao longo deste capítulo tentar-se-á explicar de que forma ele se processa e quais os factores que o condicionam.

Para uma compreensão do comportamento capilar, pode-se começar por analisar a superfície que existe entre dois fluidos [9]. Para o efeito, veja-se o caso de um líquido e um gás. Quando em contacto entre si, formam uma superfície chamada de interface. De um ponto de vista mecânico, o sistema tem um comportamento de dois fluidos homogêneos separados por uma “membrana” com uma espessura infinitesimal [9]. Esta superfície está sujeita a uma determinada tensão superficial, que age de forma tangencial à interface contraindo-a até à configuração de menor área possível, dependendo o valor, da forma como as moléculas no interior do volume de gás atraem as que se encontram à superfície [9].

Quando se observa uma gota de um líquido que entra em contacto com uma superfície de um sólido, neste caso têm-se três tipos de superfícies de interface [9]:

- 1) Líquido / gás: Esta define a interface entre o líquido e o ar envolvente;
- 2) Sólido / Líquido: Esta interface separa a superfície sólida e o líquido em si;
- 3) Sólido / gás: Esta interface separa o sólido do gás que o circunda

Em cada uma das zonas apresentadas anteriormente, actuam tensões que vão determinar o formato da gota sobre a superfície, resultando o formato final do equilíbrio de tensões entre as três superfícies de interfaces. Consoante o tipo de líquido, a gota pode apresentar no limite uma forma plana ou esférica, podendo-se dispor num sem número de formatos diferentes no intervalo destas. Este formato é definido pelo ângulo de contacto entre as superfícies de interface 1) e 2) em qualquer ponto, caracterizando a tensão existente entre sólido, líquido e gás [9]. O ângulo de contacto permite assim, estabelecer dois tipos de comportamento distintos para a gota, sendo que, para o caso em que o ângulo de contacto seja inferior a 90° , as forças intermoleculares de adesão (entre moléculas do líquido e do sólido) são superiores às de coesão (entre moléculas do mesmo líquido). No caso em que o ângulo de contacto seja superior ou igual a 90° , a situação inverte-se. O primeiro caso é designado como sendo um líquido que “molha” e o segundo um líquido que “não molha” [9]. A Figura 3.1 permite compreender de que forma se dispõe um líquido consoante o seu ângulo. Até 90° a disposição da gota aponta para um líquido que “molha” e a partir deste ponto adopta uma configuração de um líquido que “não molha” [40]. Como exemplo a água é um líquido que “molha” e o mercúrio, um líquido que “não molha”.



Figura 3.1: Ângulos de contacto de um líquido numa superfície (adaptado de [40])

Estando as forças que agem na superfície de um líquido descritas, é possível passar ao âmbito de estudo da presente dissertação que se debruçou sobre a ascensão de água por capilaridade em materiais porosos constituídos por uma rede de poros (capilares).

Quando a base de um capilar é posta em contacto com água, esta ascende no seu interior formando-se uma curvatura no topo do nível da água (menisco), pois o líquido em estudo é um líquido que “molha”, isto é, tem um ângulo de contacto inferior a 90° , levando a que as forças polares de adesão entre as moléculas de água e as moléculas da parede do poro superem as de coesão no volume de água [40]. Este menisco tem um determinado perímetro no qual existe uma interface do tipo líquido / sólido, onde se instalam tensões superficiais que podem ser extrapoladas para uma resultante na superfície no sentido ascendente, tal como ilustrado na Figura 3.2. Assim, o interface tem uma superfície de pressão superior à pressão do ar no interior do poro, originando um fenómeno de sucção a que se dá o nome de pressão capilar, causando uma ascensão de água no interior da coluna até que se atinja um equilíbrio entre as pressões que motivam a ascensão e o peso da coluna de água [25].

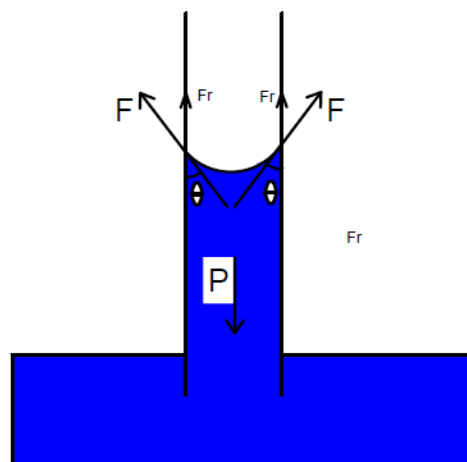


Figura 3.2: Resultante vertical de ascensão capilar

A diferença de pressão capilar Δp no interface pode ser descrita em termos de tensão superficial da água σ , do ângulo de contacto θ e do raio do capilar r , na forma [17]:

$$\Delta p = \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \quad (3.1)$$

Para que haja um equilíbrio hidrostático da coluna de água, é necessário que haja um equilíbrio entre o peso da coluna de água com uma altura h e o diferencial de pressão. Deste modo, o equilíbrio é dado pra a altura máxima da coluna de água por [17]:

$$h_{max} = \frac{2 \sigma \cos \theta}{\rho_w g r} \quad (3.2)$$

Onde:

g : aceleração da gravidade;

ρ_w : densidade do líquido;

θ : ângulo de contacto entre o menisco e o capilar

σ : tensão superficial da água

O último parâmetro, pode ser escrito em função da temperatura T (°C) com base em:

$$\sigma = (75,9 - 0,17 T) \times 10^{-3} \text{ (N/m)} \quad (3.3)$$

A Figura 3.3 ilustra de que forma o raio do capilar condiciona o valor da ascensão capilar.

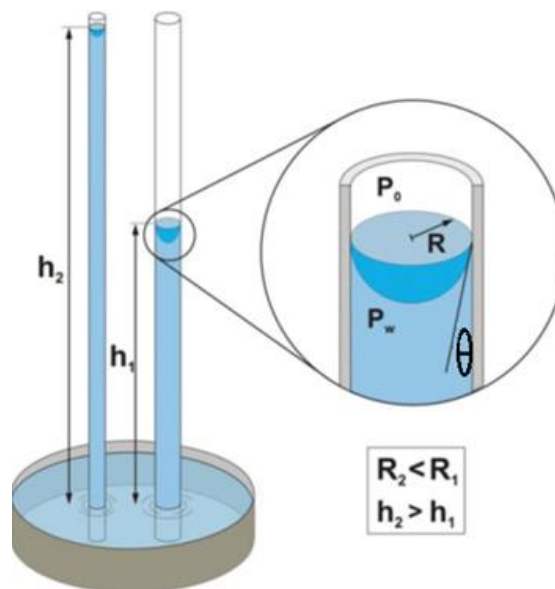


Figura 3.3: Tubos capilares (adaptado de [25])

Esta visão simplificada refere-se apenas a capilares cilíndricos, no entanto quando se observa a geometria de um corpo poroso, os espaços entre os poros não são regulares criando-se numerosas combinações de interfaces, capilares e espaços onde a água pode ficar retida. O resultado é um sem número de configurações ar-água e sólido-água.

3.2 Evolução capilar

O fenómeno de capilaridade implica, em si, a deslocação de uma determinada massa de ar contida nos poros que é substituída pela água, ao ascender pelo material. Desta forma, os fenómenos de capilaridade têm de ser vistos não só como o fluido “água” a ascender pelo material, como também o fluido “ar” a deslocar-se dando espaço à água para que ocupe o seu lugar. Isto entraria na análise de fluídos multi-fase, onde se analisa o comportamento dos sólidos, líquidos e gases. Acresce ainda o facto de a análise ser a duas ou três dimensões, já que a ascensão não se dá apenas na vertical mas sim, através da combinação de sentidos que resultam num fenómeno vertical. Desta forma, nas argamassas e nas rochas é possível fazer uma simplificação, assumindo o escoamento no sentido unidireccional pois a análise é macroscópica.

3.2.1 Forças capilares

Na ascensão de um líquido por um tubo capilar existem diversas forças às quais o líquido está sujeito. As duas equações seguintes quantificam a força de sucção F_c da água, tendo esta um efeito positivo na ascensão capilar e a força de atrito da água F_{aw} que gera resistência à ascensão capilar [17].

$$F_c = 2 \pi r \sigma_w \cos \theta \quad (3.4)$$

$$F_{aw} = -8 \pi \mu_w \frac{dx}{dt} \quad (3.5)$$

Em que:

r : raio do capilar;

σ_w : tensão superficial da água;

θ : ângulo de contacto entre o capilar e o líquido;

μ_w : viscosidade dinâmica da água.

A acrescentar, entra-se com uma força da gravidade F_g e uma força de atrito do ar F_{aa} na zona superior do poro [17]:

$$F_g = -\rho_w \pi r^2 l \cos\alpha \quad (3.6)$$

$$F_{aa} = -8\pi\mu_a(L-l)\left(\frac{dl}{dt}\right) \quad (3.7)$$

Em que:

ρ_w : massa volúmica da água;

l : altura de água;

L : comprimento do poro;

μ_a : viscosidade do ar;

α : inclinação do poro em relação à vertical.

O valor da viscosidade dinâmica da água μ_w é determinado a partir da temperatura da água T em graus Kelvin, através de:

$$\mu_w = 2,414 \times 10^{-5} \times 10^{\left(\frac{247,8}{T-140}\right)} \quad (3.8)$$

O somatório destas forças deve estar em equilíbrio podendo-se escrever a seguinte equação em que o primeiro termo é a resultante das forças, e o segundo a massa da coluna de água e a aceleração [17]:

$$\sum F_i = (\rho_w \pi r^2 l) \frac{d^2 l}{dt^2} \quad (3.9)$$

3.2.2 Modelos da evolução capilar

O termo $(\rho_w \pi r^2 l)$ da equação 3.9, representa a massa da coluna de água e o termo $\frac{d^2 l}{dt^2}$ representa a aceleração. Ao substituir os termos da sub-secção 3.2.1 no somatório e simplificando, obtém-se:

$$\frac{d^2 l}{dt^2} + \frac{8\mu_w}{\rho_w r^2} \left[1 + \frac{\mu_a(L-l)}{\mu_w l} \right] \frac{dl}{dt} - \left(\frac{2\sigma \cos\theta}{\rho_w r l} - g \cos\alpha \right) = 0 \quad (3.10)$$

A equação anterior pode ser simplificada desde que se despreze o factor da aceleração logo após o início da absorção, uma vez que, a absorção capilar regista um pico de absorção capilar inicial e em seguida estabiliza para um valor constante, sendo por isso a sua aceleração nula, reescrevendo-se a evolução do líquido num capilar na forma:

$$v_m = \frac{dl}{dt} = \frac{\rho_w r^2}{8} \left[\frac{1}{\mu_w + \mu_a \frac{(L-l)}{l}} \right] \left[\frac{2\sigma \cos \theta}{\rho_w r l} - g \cos \alpha \right] \quad (3.11)$$

Segundo Henriques [17] é possível extraírem-se algumas conclusões, desde logo, o facto de a velocidade ser nula para um comprimento máximo de absorção l_{max} . Este comprimento pode ser descrito por:

$$l_{max} = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho_w r g \cos \alpha} \quad (3.12)$$

Com o comprimento máximo, torna-se assim possível determinar a ascensão máxima da coluna de água num corpo poroso. Se for tido em conta a inclinação segundo a vertical α , a ascensão máxima será dada por:

$$h_{max} = l_{max} \cos \alpha \quad (3.13)$$

Contudo o movimento de um líquido num capilar, em especial se este tiver um diâmetro elevado, pode ser influenciado pela inércia. Deste modo Hamrauni and Nylander [16] propuseram soluções aproximadas baseadas no coeficiente de retardamento:

$$z(t) = z_e \left(1 - \exp \left[\frac{\sigma \cos \theta}{\beta z_e} t \right] \right) \quad (3.14)$$

Esta expressão converge para o valor de equilíbrio capilar z_e para longos períodos de tempo sendo o valor apresentado na equação 3.2 como h_{max} . Hamarauni e Nylander [16] mostraram que o coeficiente de retardamento adimensional (β) para capilares, varia entre um valor de $\beta=0,5$ em raios maiores ($r > r_c$) e um valor de $\beta=0,7$ para raios menores ($r < r_c$).

O raio crítico é o valor do raio do capilar, abaixo do qual os efeitos da inércia deixam de ter efeito, sendo calculado por:

$$r_c = \frac{2(\sigma \cos(\theta) \eta^2 \rho_w^2 g^3)^{\frac{1}{5}}}{\rho_w g} \quad (3.15)$$

Em que:

σ : tensão superficial;

θ : ângulo de contacto entre o líquido e o capilar;

η : viscosidade do líquido;

ρ_w : massa volúmica da água

g : aceleração da gravidade.

Hamroui e Nylander [16] concluíram ainda num estudo em que se debruçaram sobre a ascensão de água em tubos de vidro, que a ascensão não é linear tendo ligeiras oscilações, tal como descrito pelas curvas representadas na Figura 3.4.

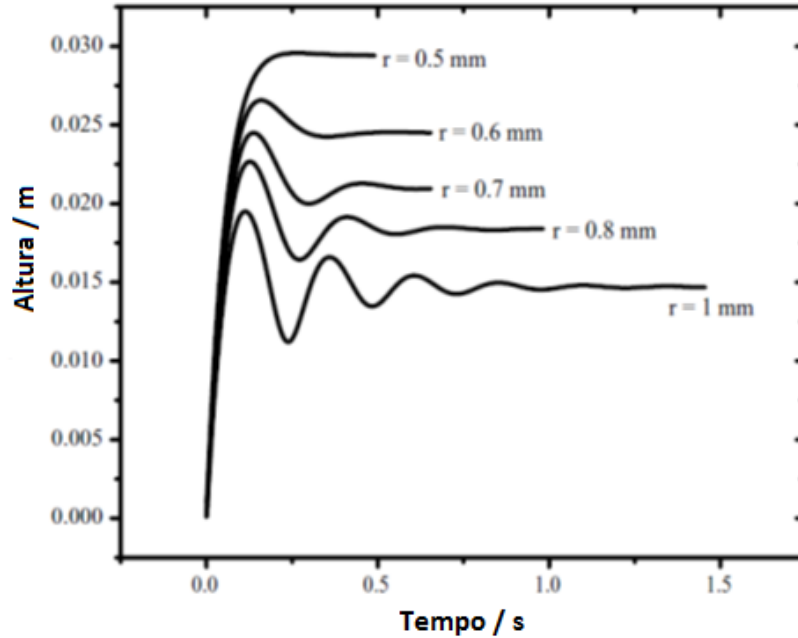


Figura 3.4: Efeito da inércia na ascensão capilar (Adaptado de [16])

Segundo os autores, esta oscilação deve-se aos efeitos da inércia, sendo tanto maior, quanto maior o raio do poro, desprezando-se para raios de poros inferiores ao raio crítico. A determinação deste valor pode ser feita de forma analítica, tal como descrito na equação 3.15. No entanto, os autores deste estudo chegaram a um raio crítico de aproximadamente 0,474mm em capilares de vidro. Desta afirmação, pode-se concluir que pequenas oscilações nos ensaios de absorção capilar podem não ser devidos ao material, mas sim devido à inércia, especialmente em materiais cuja porometria aponte para diâmetros de poros acima do raio crítico.

3.3 Fluxo horizontal de água

Os fenómenos de transporte de água podem também processar-se horizontalmente. Neste caso, o poro é considerado horizontal conduzindo a uma inclinação de 90°, sendo o respectivo coseno zero [17]. Como tal, a equação 3.11 pode ser reescrita na forma:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{dx}{dt} = \frac{r\sigma\cos\theta}{4[(\mu_w - \mu_a)x + \mu_a L]} \quad (3.16)$$

Tendo uma solução quadrática

$$2(\mu_w - \mu_a)x^2 + 4\mu_a Lx - r\sigma\cos\theta t = 0 \quad (3.17)$$

e a raiz positiva

$$x(t) = \frac{\mu_a L}{\mu_w - \mu_a} + \sqrt{\left(\frac{\mu_a L}{\mu_w - \mu_a}\right)^2 + \frac{r\sigma\cos\theta}{2(\mu_w - \mu_a)} t} \quad (3.18)$$

A distância até à frente húmida, será dependente do raio do poro e do tempo. Fica comprovado que quanto mais espessa for a camada e menor a porometria média, menor será a taxa de absorção de água [17].

Por forma a simplificar a equação anterior, o atrito do ar pode ser desprezado, podendo a equação ser reescrita na forma:

$$x = \sqrt{\frac{r\sigma\cos\theta}{2\mu_w}} \sqrt{t} = B\sqrt{t} \quad (3.19)$$

Em que B é a sorptividade ($m/s^{1/2}$). Ao multiplicar ambos os termos pela massa volúmica da água, chega-se a:

$$m_w = \rho_w B\sqrt{t} = A\sqrt{t} \rightarrow A = \rho_w B \quad (3.20)$$

Sendo que A é o coeficiente de absorção capilar, expresso em $Kg/m^2.s^{1/2}$ e m_w a quantidade de água absorvida em Kg/m^2 .

3.4 Migração após a interrupção do contacto de água

Assim que o contacto com a água cesse, a água absorvida irá permanecer contida no material migrando no interior e levando ao aparecimento de zonas intercaladas entre camadas de ar e água. Contudo, em todas as extremidades, a água adopta um formato de menisco, que depende em condições isotérmicas da secção dos poros e do ângulo de contacto [17]. Dado o elevado número de heterogeneidades da generalidade dos materiais de construção, os ângulos de contacto e as secções dos poros são variáveis não sendo possível estabelecer um sentido específico do fluxo. No entanto, o fluxo deslocar-se-á no sentido das maiores sucções que dependem do quociente $\frac{\cos\theta}{r}$, assumindo valores maiores quanto maior for a relação [17].

No presente trabalho tentou-se compreender de que forma a interrupção do fornecimento de água a uma amostra e o teor de água inicial, afecta o coeficiente de absorção capilar quando a amostra é novamente colocada em contacto com a água.

3.5 Interface

Quando dois materiais são postos em contacto entre si, forma-se uma zona de contacto à qual se dá o nome de interface. Esta, consoante os materiais e a superfície de contacto pode apresentar um sem número de disposições possíveis.

As paredes de alvenaria são um exemplo onde se podem encontrar diversos interfaces, pois entre cada dois elementos de alvenaria existe uma zona de interface. Em Portugal os elementos de alvenaria estão geralmente ligados entre si por uma argamassa, mas em alguns edifícios a pedra das fachadas era assente em junta seca sem argamassa. No presente sub-capítulo, descreve-se genericamente os tipos de interface que podem ser encontrados entre os materiais que constituem as paredes de alvenaria e apresentando-se as condicionantes de cada um.

3.5.1 Tipos de interface entre materiais

Embora os tipos de interfaces possam surgir de inúmeras maneiras diferentes, para compreender os principais, Freitas [15] divide-os em três tipos:

- continuidade hidráulica: este tipo de interface surge quando há uma penetração entre as camadas de material;
- contacto natural: dá-se quando o contacto entre as camadas não leva a penetração de um material no interior de outro;
- espaço de ar entre camadas: quando existe um espaço de ar entre as camadas.

A Figura 3.5 permite visualizar a forma como as diferentes camadas se encontram interligadas entre si.

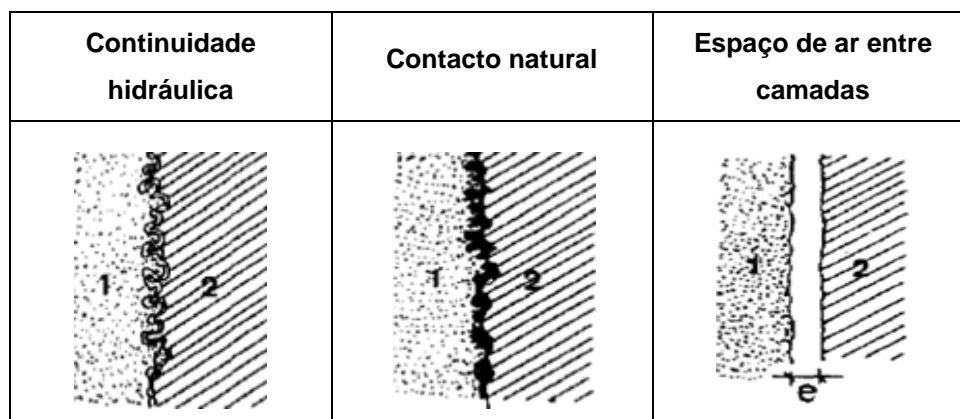


Figura 3.5: Tipos de interface [15]

3.5.2 Influência dos diferentes tipos de interface no fenómeno da capilaridade

Segundo Freitas [15], a transferência de humidade na interface é condicionada da seguinte forma:

- a) na continuidade hidráulica, devido à continuidade do material estar assegurada, a pressão capilar também está assegurada;
- b) no caso do contacto natural, como não há uma interligação entre os materiais, não existe uma continuidade da pressão capilar, havendo portanto um valor máximo para a transmissão do fluxo, que é condicionado pela resistência da interface, variando consoante os materiais em contacto;
- c) no espaço de ar entre as camadas, a transmissão do fluido dá-se apenas por difusão, sendo mais ou menos rápida consoante a concentração de vapor de água nos materiais.

Na realidade, o interface que se observa na generalidade dos casos, é uma combinação entre o contacto natural e o espaço de ar entre camadas, já que quando se assentam os blocos de alvenaria sobre a argamassa, esta não se molda completamente ao bloco, resultando vazios entre os elementos. Para além disso, durante a própria amassadura da argamassa, seja esta manual ou numa misturadora mecânica, são sempre introduzidas pequenas bolsas de ar. O presente trabalho vai debruçar-se sobre este ponto e tentar perceber se mais alguma relação se pode esperar entre o tipo de interface e o fluxo capilar.

4 Estrutura porosa

4.1 Porosidade

A generalidade dos materiais de construção utilizados nas alvenarias são materiais porosos. Dullien [9] identifica-os como sendo aqueles que cumprem pelo menos uma das seguintes condições:

- conter espaços intersticiais não preenchidos por matéria sólida (poros), distribuídos na matriz sólida; sendo geralmente ocupados por um fluido como ar, água ou vapor de água;
- ser permeável ao fluxo de diversos fluidos, isto é, os fluidos devem ser capazes de penetrar numa face do material e atingir a outra face.

O autor acrescenta ainda que para que um material seja “verdadeiramente poroso”, tem que ter uma permeabilidade específica, sendo que este valor é unicamente determinado pela geometria dos poros e é independente das características do fluido penetrante. No entanto, a forma como o líquido evolui no material é dependente das características do material em si. Para Dullien [9], as propriedades porosas do material podem ser divididas em macroscópicas e microscópicas. Para uma melhor compreensão, veja-se o seguinte exemplo segundo Rato [27]:

“Quando se analisa a capilaridade de um provete com uma forma prismática com as medidas *standard* de 16x4x4 cm, o processo passa pela sua colocação sobre uma lâmina de água na sua face de menor dimensão. Em seguida é registado ao longo de um determinado espaço de tempo a quantidade de água absorvida, bem como a velocidade inicial de absorção capilar. Esta análise dá-nos o comportamento macroscópico do material que apenas considera a direcção vertical da ascensão capilar. No entanto se for estudada a vertente microscópica é possível concluir que a ascensão não se dá apenas numa direcção, mas sim em diversos sentidos com uma resultante vertical. O comportamento macroscópico resulta assim de um conjunto de processos microscópicos”.

4.1.1 Características macroscópicas

Ao nível macroscópico, o parâmetro mais importante dentro do tema deste trabalho é a porosidade que, segundo Dullien [9] é a fracção de material que é ocupada por espaços vazios. Esta pode variar entre zero e a unidade, sendo que um metal terá um valor muito próximo de zero e certos materiais de isolamento têm um valor mais próximo de 1. No entanto, isto não basta para definir um material poroso, já que este pode ter os poros ligados entre si, formando uma rede de poros que contribui para o transporte de líquidos, representando a porosidade aberta, ou então, os poros podem não apresentar uma ligação entre si, não sendo portanto um material onde a água possa circular, fazendo parte da porosidade fechada. Existe ainda a possibilidade dos poros do material se encontrarem apenas abertos num dos lados, neste caso a sua influência no transporte de líquidos é negligenciável. A caracterização da estrutura porosa dos materiais é efectuada no sub-capítulo 4.3.

4.1.2 Características microscópicas

Assumindo que o comportamento macroscópico resulta de um alargado número de fenómenos microscópicos, torna-se necessário conhecer os parâmetros microscópicos que vão caracterizar o comportamento de um material poroso. Nestes inserem-se a estrutura porosa que integra a geometria, bem como a topologia dos poros. A primeira engloba a distribuição, a forma e a dimensão dos poros, enquanto que a segunda aborda a forma como os poros estão conectados entre si [10].

Segundo Dullien [9], consoante a variabilidade de todos os parâmetros anteriores, é feita uma análise da porometria que agrupa os poros com dimensões e características semelhantes. Em certos casos a topologia dos poros prevalece sobre os parâmetros geométricos, especialmente se a conectividade for baixa [19]. No caso de materiais muito granulares tais como os arenitos, o número de ligações a um poro de grandes dimensões é relativamente grande. Já em rochas cristalinas existe um número de ligações muito reduzido. Uma rede de poros que esteja fracamente conectada entre si tal como as rochas cristalinas é denominada, segundo Tauffer [36] crítica ou no limiar da percolação, correspondendo ao ponto em que deixa de haver uma continuidade que permita o transporte do fluido dentro de um material poroso. Nas rochas sedimentares o processo de diagénese (sedimentação e compressão) modifica a porosidade, a permeabilidade e a distribuição da estrutura porosa não sendo, portanto, possível estabelecer para todas um comportamento base, no entanto, a desconectividade entre poros só existe para valores muito baixos de porosidade [19].

Outra forma de caracterizar topologicamente um material parte da definição de Genus (G). Um Genus representa o maior número de cortes que não se intersectam entre si e que podem ser realizados numa superfície sem desconectar as partes do corpo [9]. A conectividade é uma medida do número de caminhos independentes entre dois pontos no espaço de poros e, conseqüentemente, o grau de interligações entre os poros.

O Genus é dado por:

$$G = b - n + N \quad (4.1)$$

Em que b é o número de ramos, n o número de nós, e N o número de redes separadas na amostra. Para que se consiga perceber de que forma é que se processa este cálculo, atente-se na Figura 4.1 que ilustra redes separadas ($N=1$):

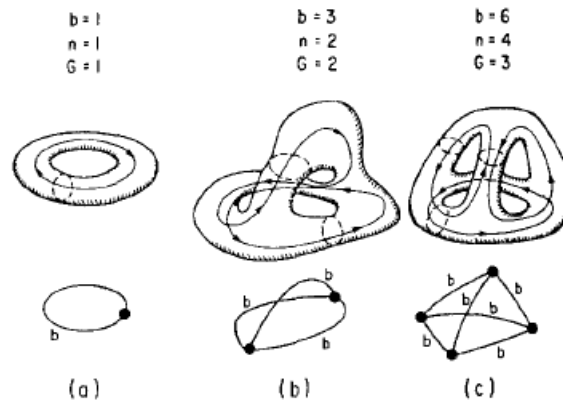


Figura 4.1: Ligações em meios porosos [9]

Na figura Figura 4.1 a) observa-se uma pequena porção de uma amostra seccionada em que o número de Genus é 1. Já na Figura 4.1 b), a complexidade das ligações entre os nós é maior e surge ainda a problemática de não se saber como estão ligados no exterior da amostra, resultando num número de Genus de 2. Finalmente, com uma maior complexidade, a amostra da Figura 4.1 c) tem um número de Genus igual a 3.

Devido à irregularidade dos meios porosos típicos nos materiais de construção correntes, torna-se complicado padronizar uma geometria específica dos poros, podendo esta variar consideravelmente numa amostra.

O transporte de fluidos num material é condicionado pela porosidade aberta, onde os poros de maiores dimensões estão ligados entre si por poros de menores dimensões.

4.2 Modelos para a caracterização dos poros

Os modelos mais utilizados para representar a dimensão do poro por analogia com a da partícula de acordo com Popovics [26] são:

- Diâmetro de volume equivalente, D_v , que corresponde ao diâmetro de uma esfera com um volume igual ao do poro $D_v = \sqrt[3]{\left(\frac{6V}{\pi}\right)}$ onde V é o volume do poro;
- Diâmetro superficial equivalente, D_s , que corresponde ao diâmetro de uma esfera com superfície igual a do poro $D_s = \sqrt{\left(\frac{S}{\pi}\right)}$ onde S é a superfície do poro;
- Diâmetro de superfície específica equivalente, D_{sp} ; que corresponde ao diâmetro de uma esfera com superfície específica (área por unidade de volume) igual à do poro $D_s = 6 \left(\frac{V}{S}\right)$ em que V/S é a relação entre o volume e a área superficial do poro;
- Diâmetro hidráulico médio, $D_h = 4 \left(\frac{V}{S}\right)$ em que V/S é a relação entre o volume e a área superficial do poro.

Para a classificação dos poros em si, Fitzner [14] – Citado por Rato [27] compilou as classificações existentes em três quadros distintos na Tabela 4.1:

Tabela 4.1: Classificação da dimensão dos poros [14]

De Quervain (1967)	DIN 66131 (1973)	Klopfer (1985)
Micróporos: $<5\mu\text{m}$ Poros finos: $5\mu\text{m}-200\mu\text{m}$ Poros grosseiros: $200\mu\text{m}-2000\mu\text{m}$ Grandes poros: $>2000\mu\text{m}$	Micróporos: $<0,002\mu\text{m}$ Mesoporos: $0,002\mu\text{m}-0,05\mu\text{m}$ Macroporos: $>0,05\mu\text{m}$	Micróporos: $<0,1\mu\text{m}$ Poros capilares: $0,1\mu\text{m}-1000\mu\text{m}$ Macroporos: $>1000\mu\text{m}$

No âmbito deste trabalho, será a classificação de Klopfer que terá mais interesse, na medida em que apresenta uma clara distinção de poros, dividindo-os pelos valores que limitam os fenómenos de capilaridade.

Para a definição da forma dos poros, Collet [3] citado por Correia [4], através das curvas de intrusão e extrusão incremental de mercúrio, divide os poros em cilindros, esferas, rods, agulhas e placas, tal como apresentado na figura 4.2:

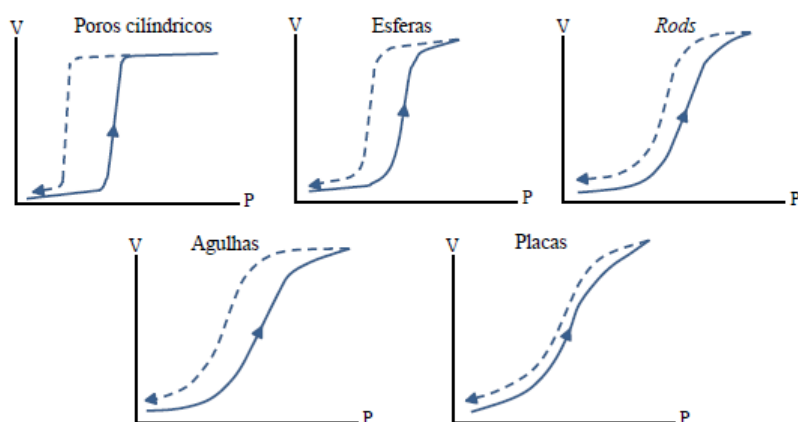


Figura 4.2: Curvas de intrusão e extrusão de mercúrio para os diferentes tipos de poros ([4] adaptado de [3])

4.3 Métodos para a caracterização da estrutura porosa

4.3.1 Método gravimétrico

Este método permite determinar a massa volúmica, a porosidade aberta e a porosidade fechada. Durante este processo, a amostra passa por uma secagem completa seguindo-se um processo de vácuo para extrair todo o ar dos poros, para que numa fase posterior quando a amostra

for imersa a evolução da água não seja limitada por bolsas de ar. Quando o material se encontra completamente saturado, é possível através da massa seca, da massa saturada e da massa saturada com a amostra imersa em água, obter o valor da porosidade do material [11].

O presente ensaio tem a vantagem de permitir a análise de materiais com formatos irregulares e de não ser um método destrutivo, permitindo repetir o ensaio caso se pretenda.

4.3.2 Microscópio óptico

Permite fazer uma observação mineralógica e textural bem como o afastamento entre poros [2]. É ainda muito útil para a observação das zonas de interface entre materiais. Actualmente, com a introdução da análise de imagens, melhorou-se bastante a avaliação estatística da porosidade, da dimensão e forma dos poros. É de referir que a impregnação com material colorido ou a exposição a raios ultravioleta fluorescente ajudam na análise das imagens obtidas [2]. As amostras devem ser cortadas em secções finas e polidas, permitindo assim uma correcta análise da superfície.

4.3.3 Microscópio electrónico de varrimento (SEM)

Este método permite uma resolução acima de $0.001\mu\text{m}$ tornando possível uma precisa descrição da geometria e da distribuição espacial dos poros [2]. A desvantagem reside no facto da informação estatística sobre a porosidade ser muito reduzida, já que a área em análise é diminuta. Para que possa ser razoavelmente bem-sucedido, este método deve ser repetido em diversas secções.

4.3.4 Porosimetria de mercúrio (MIP)

É o mais amplamente utilizado para caracterizar a estrutura de materiais porosos que tenham um diâmetro de poros que variem entre os 360 e os $0,0055\mu\text{m}$ [2]. Baseia-se no princípio físico de que o mercúrio é um fluido que “não molha” (ângulo de contacto superior a 90°) para a maioria dos materiais e, como tal, requer uma pressão externa para o forçar a entrar nos poros. E de acordo com a expressão de Washburn [29]:

$$\Delta p = \pm \frac{2\gamma \cos\theta}{r} \quad (4.2)$$

em que p é a pressão, γ tensão superficial do líquido, θ o ângulo de contacto do líquido e r o raio do capilar, quanto menor o raio do poro maior a pressão necessária para injectar mercúrio. A distribuição dos poros é determinada pelo volume de intrusão de mercúrio a cada acréscimo de pressão, enquanto a porosidade total calculada com base no volume total de intrusão de mercúrio. O diâmetro dos poros

é determinado com base na pressão de intrusão com a relação linear entre a pressão e o diâmetro do poro, em que, para que se dê a intrusão de mercúrio num capilar com um diâmetro de $1\text{ }\mu\text{m}$ é necessário exercer uma pressão de 1MPa. Neste método adopta-se uma simplificação puramente matemática em que se assume que os capilares são cilíndricos evitando entrar em linha de conta com as irregularidades dos poros.

No entanto, este método apresenta alguns contratempos. Em primeiro lugar, não faz uma medição real da distribuição da dimensão dos poros, detectando o diâmetro da entrada do capilar em vez do diâmetro real do poro [2]. Em segundo lugar, os poros são assumidos como sendo cilíndricos e completamente acessíveis pela penetração de mercúrio na superfície da amostra, adicionalmente surge ainda o facto de este método assumir que o meio poroso consiste na ligação de tubos capilares interconectados, o que pode estar muito longe da realidade, uma vez que o espaço nos poros das rochas é mais tortuoso e consiste num largo número de poros conectados por pequenos poros mais estreitos [2]. Finalmente, como o porosímetro necessita de impor elevadas pressões a uma amostra para injectar mercúrio em pequenos poros, pode-se dar o rompimento dos poros fazendo com que, poros que não eram acessíveis passam a ser preenchidos com mercúrio, o que afecta os resultados do porosímetro de mercúrio [29].

4.3.5 Adsorção de nitrogénio

É considerado o melhor método para a detecção de micróporos, tendo um alcance entre $0,001$ e $0,1\text{ }\mu\text{m}$ [2]. Os dados porométricos são calculados pela quantidade de gás isotérmico adsorvido pelo material poroso.

4.4 Relações entre porosidade e capilaridade

Baseando-se na equação de Washburn, Young [41] desenvolveu uma equação que pretende determinar a progressão do interface em capilares cujo diâmetro seja variável, concluindo que quanto menor o diâmetro maior será o tempo de humedecimento.

A capilaridade pode estar condicionada por poros “não capilares”, tal é referido por Verbeck [38] citado por Rato [27] em que no seu estudo conclui que o espaço disponível para o fluxo é reduzido pelos espaços preenchidos por água adsorvida. Este volume de vapor de água, ao contrário da capilaridade, entra em poros a partir dos 50nm [23]. Logo, poros que, em princípio, não condicionariam o efeito capilar por serem demasiado estreitos, passam a condicioná-lo.

4.5 Porometria após absorção de água

Em geral os materiais porosos foram expostos ao longo dos anos a ciclos de absorção e secagem de água, o que alterou a sua estrutura porosa. Segundo Li Dejian [21], no seu estudo sobre arenitos e rochas argilosas, concluiu que após a absorção de água, as rochas sofrem alterações na sua porometria. Para o efeito, extraiu rochas de zonas em que a precipitação fosse muito reduzida como no Tibete. Desta forma, foi possível comparar a estrutura porosa das rochas antes e depois da sua exposição a uma fonte de humedecimento. No seu estudo pode concluir o seguinte:

- d) A capacidade de absorção inicial altera para todo o tipo de rochas ensaiadas e a taxa de absorção de água em função do tempo acelera rapidamente, desacelerando posteriormente de forma mais lenta até uma determinada taxa variável;
- e) Uma grande quantidade de novos poros apareceram em todas as amostras e a dimensão dos poros aumentou consideravelmente nas amostras de arenitos;
- f) Uma grande quantidade de poros de pequenas dimensões nas amostras de argilas foi preenchida;
- g) A porosidade superficial aumentou após a absorção de água e a complexidade da estrutura porosa aumentou.

Li Dejian [21] debruçou-se apenas sobre rochas, contudo no presente trabalho o estudo também se debruçou sobre argamassas que constituem as paredes de alvenaria correntes. Nestes casos, como a água proveniente do solo transporta finos que se vão depositando, acabam por agir como um filtro reduzindo o coeficiente de absorção capilar. Quando a argamassa é de cal aérea, como o período de carbonatação é muito elevado, em especial quando se trata de paredes de elevada espessura onde o dióxido de carbono tem dificuldade em chegar, a argamassa pode demorar muitos anos até estar completamente carbonatada. Rato [27] refere que a estrutura porosa nestes casos vai sendo continuamente alterada durante a carbonatação, sem que se conheça o seu grau de variabilidade. Como tal, a ascensão capilar também ela é variável ao longo do processo na medida em que depende directamente da estrutura porosa como referido no sub-capítulo 4.4.

Estas assunções são válidas para a rocha e para a argamassa em si desprezando a existência de sais. No entanto, a presença de sais especialmente em edifícios antigos nunca pode ser desprezada. Rirsch [30] no seu estudo aponta que, em edifícios antigos a ascensão capilar de água aumenta na razão de 7 vezes entre o primeiro ano da construção e após cem anos. Tal é justificado pelo autor ao afirmar que o processo lento e gradual de absorção de água na estrutura com a consequente evaporação leva a depósitos de sais nas paredes, agindo a alvenaria, como um filtro para águas impuras à medida que os sais solúveis são conduzidos para a parede e depois deixados para trás, bloqueando, desta forma, os poros que permitiam a evaporação.

5 Análise experimental

Os materiais ensaiados da presente dissertação foram escolhidos por forma a abranger uma alargada gama de porometrias e ao mesmo tempo abordar alguns casos observados no edificado. Deste modo foram analisados calcários, granito, tijolos maciços e materiais que constituíam o enchimento de paredes de três panos.

Primeiramente caracterizaram-se os materiais e a sua estrutura porosa, para o efeito foram realizados ensaios para determinar a porosidade aberta pelo método gravimétrico. Para dar a conhecer a estrutura porosa de cada amostra, estas foram sujeitas ao ensaio por intrusão incremental de mercúrio para que mais tarde pudesse ser feita uma comparação entre os ensaios de capilaridade e a porometria dos materiais.

Numa fase posterior foram produzidos provetes mistos combinando-se argamassas de cal aérea e de cal hidráulica produzida em laboratório com as amostras de pedras e de tijolo. Este tipo de provetes permitiu a análise dos fenómenos de capilaridade no interface em duas fases. Numa primeira fase foi colocada a argamassa em contacto com a água e estudou-se de que forma se dava a migração de água no interface e numa segunda fase colocou-se a pedra ou o tijolo em contacto com a água realizando-se uma análise análoga. Para estudar de que forma a variação do interface poderia influenciar a ascensão capilar realizaram-se ensaios de capilaridade com interface simples que preconizou a saturação de um meio inferior em argamassa de cal aérea, sobrepondo-se-lhe em seguida um provete de calcário amarelo ou de tijolo e registando-se a curva de absorção capilar e numa segunda fase sobrepueram-se meios idênticos

Foram ainda realizados ensaios de capilaridade em que o teor de água inicial das amostras variava permitindo estudar de que forma a ascensão capilar variava em função do teor de água inicial. Finalmente realizaram-se ensaios de capilaridade em sentido horizontal que permitiram conhecer de que forma a gravidade influencia a absorção capilar.

Os valores de interesse foram o coeficiente de absorção capilar que permitiu extrair a quantidade de água absorvida por unidade de área em função do tempo e a sorptividade que permitiu conhecer a evolução da frente húmida em função do tempo.

5.1 Materiais ensaiados

Calcários da região de Coimbra

As amostras obtidas de calcários são provenientes da região de Coimbra. Uma delas apresenta uma cor amarelada e uma textura uniforme como se pode ver na Figura 5.1 à esquerda, sendo denominada durante o trabalho de calcário amarelo. A segunda apresenta uma cor branca e uma textura uniforme, sendo a rocha da figura 5.1 à direita e a sua denominação ao longo do trabalho foi de calcário branco.



Figura 5.1: Calcário amarelo e calcário branco

Tijolo maciço

Até ao princípio do século XIX os tijolos eram produzidos manualmente. Para o efeito, eram utilizados moldes de madeira dentro dos quais se inseria uma pasta de barro húmida, seca ao ar e cozida [34]. Com o passar dos anos e para corresponder à procura de material, o processo foi industrializado passando a ser realizado quase na sua totalidade com recurso a maquinaria seguindo as seguintes etapas:

- i) Extracção da matéria-prima;
- ii) Mistura;
- iii) Moldagem;
- iv) Secagem;
- v) Cozedura;
- vi) Embalamento.

A Figura 5.2 ilustra a amostra obtida para este trabalho, de onde se pode concluir que o seu método de fabrico foi artesanal dada a sua elevada irregularidade, que não seria visível nos processos actuais.



Figura 5.2: Tijolo maciço

Granito

O granito forma-se em profundidade e ao ser exposto às condições ambientais diferentes do local em que se forma, originam-se diaclases. Estas são superfícies de fractura que dividem o maciço rochoso em blocos de forma mais ou menos paralelepipedica, tornando o maciço mais vulnerável a acções de meteorização pois a entrada de água com agentes acidificantes (CO_2) passa a ser mais facilitada [44]. Este processo de degradação não só se dá nos maciços de granito, como também após a sua aplicação em obra. Nas zonas mais expostas de um edifício de granito, estes blocos tendem a perder coesão desintegrando-se e convertendo-se em areia grosseira. As micas e os feldspatos reagem com a água ácida originando minerais de argila, aumentando o grau de degradação da rocha o que leva à transformação de um granito inicialmente são, num granito alterado que facilmente pode ser desfeito à mão. Exemplo disso é a amostras da Figura 5.3 utilizada durante os ensaios.



Figura 5.3: Granito

O granito e o tijolo maciço foram extraídos de edifícios em ruína na zona de Castelo Branco, encontrando-se com algum estado de degradação. Já os calcários apresentavam-se sãos.

5.2 Método de extração das amostras do enchimento de paredes

Na construção de paredes de alvenaria de três panos, os enchimentos variavam consoante a zona do país, usando-se o material que se tinha mais perto para reduzir os custos e aumentar a velocidade de execução.

Tendo em conta a consistência granular do enchimento deste tipo de paredes, a extracção foi pensada por forma a conseguir retirar amostras sem que a ordem dos materiais e a própria consistência fosse alterada. Assim, numa primeira fase fez-se uma prospecção dos edifícios que se encontravam em elevado estado de degradação dando preferência àqueles em que parte da parede já tivesse colapsado, ou apresentasse uma lacuna que permitisse um fácil acesso ao interior. Para se atingir este

objectivo, foram cortados tubos metálicos com um diâmetro interior de 28mm e posteriormente cravados no enchimento. Para facilitar não só a introdução do tubo como também a sua extracção, foram feitos dois furos onde era presa uma “chave” que permitia rodar o tubo à medida que este entrava ou saia. Todavia, em alguns casos a rotação não foi suficiente o que obrigou a introduzir os tubos com recurso a percussão. Posteriormente, foram envoltos em película aderente para evitar que se perdesse material. Este método foi utilizado em todos os edifícios analisados. A Figura 5.4 ilustra as fases da extracção das amostras.



Figura 5.4: Método para a extracção de amostras de enchimento de paredes

Material de enchimento de parede em Almada

Localizado no Monte da Caparica, a parede da Figura 5.5 faz parte de um conjunto de edifícios, todos eles com a mesma construção. Deste, apenas restou a parede de empena e uma parte da fachada, tendo a parede 0,80m de espessura na sua base. A sua construção é em pedra calcária da zona, com o enchimento e as juntas em material granular com uma cor alaranjada. No enchimento identificaram-se restos de tijolos maciços, pedras finas e o mesmo material da junta.



Figura 5.5: Parede de alvenaria em Almada de onde se extraiu o enchimento

Material de enchimento de parede em Costas do Cão

Localizado em Costas do Cão, Almada, este edifício fazia parte de uma antiga adega isolada, do qual restam as 4 paredes. Foi possível extrair o material do seu interior através de uma fenda onde se conseguiu introduzir a mão. A Figura 5.6 ilustra a zona de extração e ao mesmo tempo, permite dar uma ideia de que a construção será semelhante à anteriormente apresentada, onde se identificam restos de tijolo e pedra calcária.



Figura 5.6: Pormenor de parede em Costas do cão de onde se extraiu o material de enchimento

Material de enchimento de parede em Castelo Branco

A Figura 5.7 ilustra a zona de extração numa parede de um antigo armazém agrícola em Castelo Branco constituído por paredes de alvenaria de três panos, sendo as exteriores feitas em granito e o seu enchimento de material granular variado. Uma medição na sua base permitiu registar uma espessura de aproximadamente 1,20m.



Figura 5.7: Extração de amostras numa parede em Castelo Branco

Material de parede Portimão

As amostras extraídas em Portimão são provenientes de um antigo edifício habitacional em taipa como ilustra a Figura 5.8. Para evitar retirar uma amostra de uma zona que tivesse sido exposta à acção da chuva, foi removido um painel de reboco e a amostra retirada dessa zona.



Figura 5.8: Extração de amostras numa parede de taipa em Portimão

Material de enchimento de paredes de Alvaiázere

Em Alvaiázere foi possível extrair de dois edifícios em ruínas dois tipos de amostras distintas. Na figura 5.9 a) apresenta-se o edifício de onde foram extraídas as amostras a que foi dado o nome de Alvaiázere (cal), tal designação surgiu pelo facto de a sua cor ser branca e a do terreno envolvente ser acastanhada, levando a crer que o ligante seria cal aérea. Na Figura 5.9 b) o edifício de onde se extraíram as amostras a que foi dado o nome de Alvaiázere (terra) dada a sua cor ser muito semelhante à do solo do terreno envolvente.



a)



b)

Figura 5.9: Ruínas de onde foram extraídas amostras de Alvaiázere cal a) e de onde se extraíram as amostras de Alvaiázere terra b)

5.3 Preparação dos provetes de pedra e de tijolo

Para a execução de todos os ensaios ao longo do presente trabalho, foi necessário cortar provetes com dimensões tais, que permitissem caracterizar o material das amostras de pedra e de tijolo. Os primeiros provetes foram cortados com dimensões regulares de aproximadamente 4x4x5 (cm). A sua utilização destinou-se aos ensaios de capilaridade em provetes de pedra ou tijolo, capilaridade em sentido horizontal, ciclos de absorção de água por capilaridade para diferentes teores de água e aos ensaios de capilaridade com interface simples

Para além destes ensaios, foram ainda realizados ensaios de capilaridade em provetes mistos para dar a conhecer o fenómeno de capilaridade no interface entre dois materiais. Nesse caso, tendo em conta as características de cada material e ao mesmo tempo a sua trabalhabilidade (limite de espessura para corte), foi decidido cortar provetes com as dimensões apresentadas na tabela 5.1 sendo o resultado apresentado na Figura 5.10.

Tabela 5.1: Dimensão para o corte dos provetes

Material	Dimensões (mm)
Granito	40x40x50
Calcário Amarelo	40x40x20
Calcário Branco	40x40x20
Tijolo	40x40x20
Argamassa de cal aérea	40x40x80
Argamassa de cal hidráulica	40x40x80



Figura 5.10: Aspecto final dos provetes após o corte

Após o corte observou-se que a superfície resultante era muito lisa, o que propiciaria uma ligação entre a argamassa e a pedra ou o tijolo, muito frágil. Deste modo, para aumentar a aderência foi necessário tornar a superfície mais irregular, executando-se uma escovagem de um sentido em todos os provetes com uma escova metálica. Como a dureza entre as diferentes amostras variava consideravelmente, o número de repetições foi diferente, mas sempre com o objectivo de obter uma superfície de escovagem semelhante. Este processo pode ser observado na Figura 5.11.



Figura 5.11: Escovagem das superfícies de contacto dos provetes

5.4 Argamassas

No presente trabalho as areias utilizadas para o fabrico de argamassas são da marca “Areipor-Areias portuguesas, Lda”, sendo utilizados três tipos de areias:

- APAS 12: Areia grossa;
- APAS 20: Areia intermédia;
- APAS 30: Areia fina.

A baridade das areias é apresentada na tabela 5.3. e as curva granulométrica na Figura 5.12.

Tabela 5.2: Baridade das areias utilizadas no fabrico de argamassas

	Areias		
	APAS 12	APAS 20	APAS 30
Baridade [Kg/m³]	1418	1398	1368

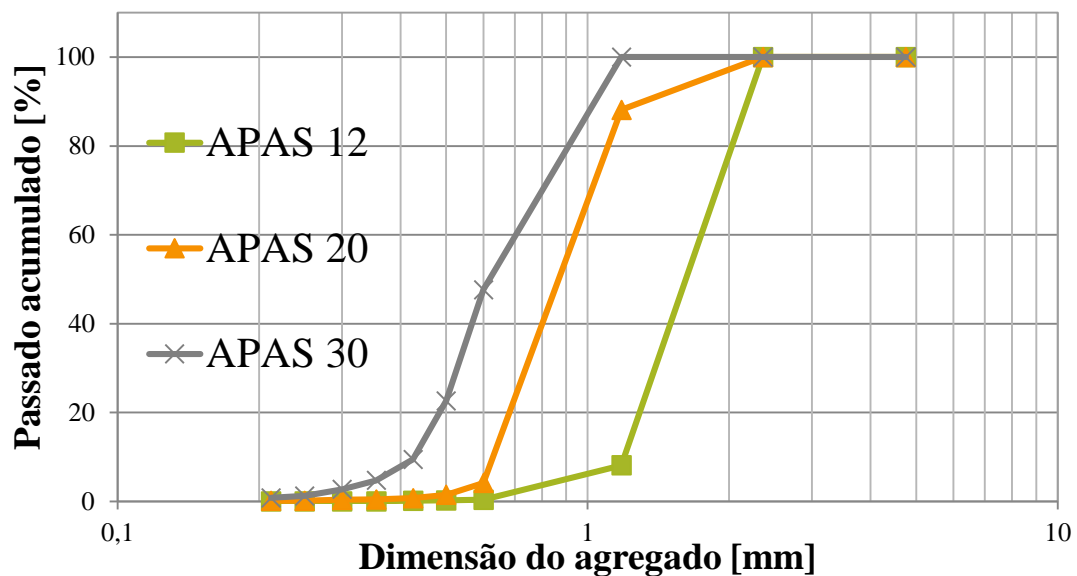


Figura 5.12 Curvas granulométricas das areias utilizadas no fabrico de argamassas

5.5 Traço das argamassas

Foi decidido para a realização de alguns ensaios, a produção de duas argamassas com ligantes diferentes, mas de igual traço volumétrico. A primeira utiliza cal hidráulica natural NHL3,5 com traço de 1:3 e a segunda constituída por cal aérea CL com um traço de 1:3.

5.5.1 Argamassa de cal aérea

Nas argamassas de cal aérea foi realizada a mistura que se apresenta na tabela 5.3:

Tabela 5.3: Dosagem para argamassa de cal aérea

Material	Massa (g)	Volume (ml)
Areia APAS 12	1129,6	800
Areia APAS 20	1686	1200
Areia APAS 30	1665,6	1200
Cal Aérea	386,1	-
Água	975	975

5.5.2 Argamassa de cal hidráulica

Nas argamassas de cal hidráulica foi realizada a mistura que se apresenta na tabela 5.4:

Tabela 5.4: Dosagem para a argamassa de cal hidráulica

Material	Massa (g)	Volume (ml)
Areia APAS 12	1129,6	800
Areia APAS 20	1686	1200
Areia APAS 30	1665,6	1200
Cal hidráulica	581,6	-
Água	925	925

5.6 Amassadura

O processo de amassadura foi o mesmo para todas as argamassas, de forma a não introduzir variações no produto final.

Procedeu-se à pesagem de todas as areias e da cal de acordo com as quantidades definidas nas tabelas 5.3 e 5.4. Em seguida, homogeneizou-se o material a seco com recurso a uma colher de pedreiro, observando-se na figura 5.13 o processo de pesagem e uniformização.

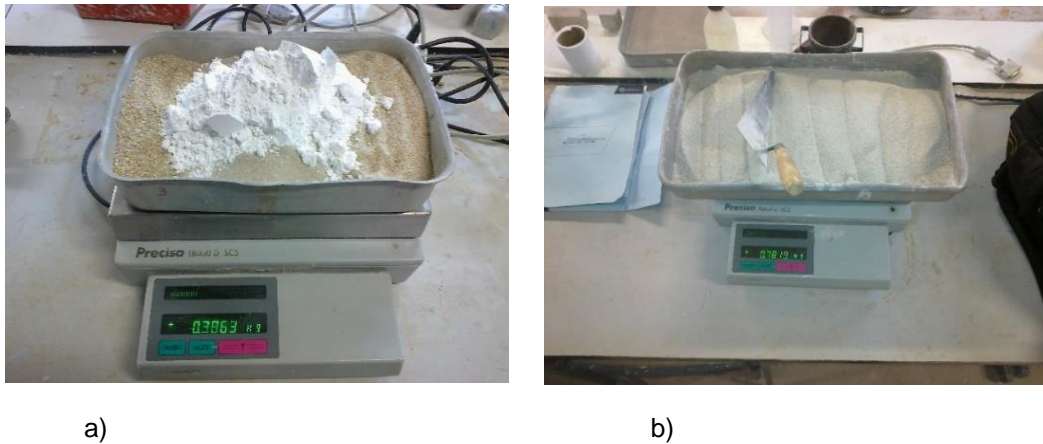


Figura 5.13: Pesagem a) e uniformização b) dos agregados e ligante para a argamassa

A mistura homogeneizada foi introduzida no interior da cuba do misturador mecânico. Posteriormente, foi medida a quantidade de água necessária à amassadura na proveta de acordo com as tabelas 5.4 e 5.5. Já com a misturadora mecânica em funcionamento, foi adicionada a água, realizando-se uma amassadura com uma duração de 3 minutos como ilustrado na Figura 5.14, até que a mistura ficasse uniforme.



Figura 5.14: Amassadura da argamassa

5.7 Preparação dos provetes de argamassa

Depois de preparados, fixaram-se os moldes no compactador mecânico e procedeu-se à colocação de argamassa em duas fases, com a compactação intermédia e final de 20 pancadas cada, utilizando-se para o efeito o sistema da Figura 5.15



Figura 5.15: Enchimento dos moldes no compactador mecânico

O molde metálico foi solto e retirou-se o excedente com uma colher de pedreiro, tendo o cuidado de ao retirar a argamassa, se aplicar alguma pressão para que todo o molde ficasse preenchido, sendo o resultado final o que se pode visualizar na Figura 5.16.



Figura 5.16: Aspecto final dos provetes no molde após alisamento

Ao fim de 7 dias à temperatura e humidade relativa ambientes, os provetes estão em condições de serem desmoldados cuidadosamente.

5.8 Execução de provetes mistos de argamassa / outros

Provetes mistos são provetes que resultam da combinação de uma camada de argamassa de cal aérea ou de cal hidráulica e outra de um material, que, no âmbito das experiências realizadas foi:

- i) Calcário amarelo;
- ii) Tijolo;
- iii) Granito.

Com vista a minimizar as perdas de humidade pelas faces laterais dos provetes, foi decidido pinta-las com resina. Deste modo, pra a realização deste tipo de provetes foi necessário numa primeira fase proteger as amostras de tijolo e de pedra com material plástico, por forma a evitar que estas ficassem contaminadas com óleo desmoldante, o que iria inviabilizar a aplicação da resina mais tarde. Para evitar fissuras na zona de ligação entre a argamassa e o material em estudo, os materiais que são adicionados, foram previamente imersos em água. Nos moldes metálicos prismáticos (4x4x16 cm) foi aplicado óleo desmoldante para facilitar na altura da desmoldagem dos provetes e para ajustar a altura de argamassa em função do tipo de pedra, foram cortados e colocados no interior dos moldes espaçadores de EPS como ilustra a Figura 5.17, onde se pode ver no extremo direito um molde com menor espessura de EPS correspondendo ao molde onde foram produzidos os provetes mistos de argamassa e granito.



Figura 5.17: Preparação dos moldes para os provetes mistos

Com os moldes preparados, O processo seguiu as directivas descritas no sub-capítulo 5.7.1 sendo o resultado visível na Figura 5.18.



a)



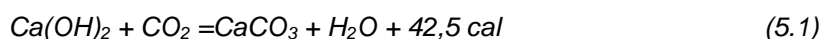
b)

Figura 5.18: a) aspecto final dos provetes mistos de granito e argamassa de cal aérea, após alisamento b) aspecto final dos provetes mistos de tijolo e argamassa de cal aérea, após alisamento

5.9 Carbonatação acelerada

Para possibilitar a realização dos ensaios em tempo útil, foi decidido colocar os provetes numa câmara com CO₂ de modo a acelerar a carbonatação dos provetes. Este método permitiu que a carbonatação completa dos provetes ocorresse num dia.

Tal como descrito na equação 5.1 durante este processo, é libertada energia [5].



Deste modo, foi previamente introduzido um termómetro no interior da câmara o que permitiu acompanhar a reacção de carbonatação. Enquanto o termómetro registasse um aumento de temperatura, ou um valor acima da temperatura ambiente, indicava que a reacção se estava a processar. Quando a temperatura comesasse a descer, indicava que a reacção tinha cessado, significando que, ou o CO₂ se tinha esgotado, ou a reacção já se encontrava completa. Nessa altura, era então introduzida uma vela no interior da caixa e, caso se apagasse (o que indicava a presença de CO₂), em princípio a reacção de carbonatação estava completa. Caso não se apagasse, indicava que todo o CO₂ se tinha consumido introduzindo-se desta forma, novamente CO₂ e repetindo-se o processo até que a vela se apagasse. Para garantir a carbonatação das argamassas, foram retirados os provetes de teste, cortados e molhados com uma solução de fenolftaleína. Sempre que a superfície molhada ganhasse uma coloração rosa, indicava que a reacção de carbonatação não estava completa. Caso não houvesse alteração significativa da cor, indicava que a reacção de carbonatação tinha cessado. Sempre que a carbonatação não estava completa até à zona central dos provetes, eram novamente colocados no interior da câmara com CO₂ e repetido o processo até que os provetes de ensaio carbonatassem completamente.

5.10 Porosimetria de mercúrio (MIP)

Visto a presente dissertação ter como objectivo a análise dos mecanismos de capilaridade em corpos porosos, tornou-se necessário realizar análises às amostras que fornecessem dados acerca da distribuição dos poros. Visto o porosímetro de mercúrio ser aquele que consegue fazer uma análise da distribuição dos poros numa gama que assegure grande parte dos fenómenos de capilaridade e ser o equipamento disponível, optou-se pela sua utilização. Deste modo, foram analisadas as amostras de todas as pedras, do tijolo maciço e das argamassas de cal aérea e hidráulica. Adicionalmente foram ainda analisadas as amostras do material de enchimento das paredes de Castelo Branco e Alvaiázere (cal). As restantes amostras de enchimento dado serem muito granulares não foi possível a sua análise.

5.11 Massa volúmica e porosidade

Os valores da massa volúmica e da porosidade aberta foram determinados com base nas fichas de ensaio Fe 01 [10] e Fe 02 [11], cujo campo de aplicação são as pedras naturais ou artificiais. Este procedimento tem como base a saturação por vácuo e utilizou três provetes irregulares de todos os tipos de materiais em estudo.

Os provetes foram condicionados numa estufa a 60°C durante um período de tempo igual ou superior a 48h, até que a diferença entre duas pesagens sucessivas, num intervalo de 24h, fosse inferior a 0,1%. Em seguida foram armazenados num exsicador com sílica-gel até arrefecerem à temperatura ambiente. Nessa altura, foram pesados numa balança com uma precisão de 0,001g extraindo-se a massa inicial m_0 e colocados no exsicador que se encontra na Figura 5.19 que não contém sílica, uma vez que numa fase posterior do ensaio, se adiciona água no exsicador para saturar o sistema. A este, foi ligado o sistema tal como apresentado na figura 5.19.



Figura 5.19: Sistema de vácuo

A bomba de vácuo foi accionada colocando os provetes em vácuo o que lhes retirou todo o ar retido no interior dos poros, mantendo-se o sistema nestas condições durante 24h. Concluído este período, introduziu-se água no interior do exsicador até cobrir os provetes e sem nunca desligar a bomba de vácuo, deixando-se o sistema nestas condições por mais 24h. Findo este período, desligou-se a bomba de vácuo e foi-lhe retirada a tampa, mantendo-se os provetes dentro de água durante mais 24h às condições de pressão ambiente.

Para finalizar, foram realizadas duas pesagens, uma com os provetes imersos em água de onde se extraiu massa hidrostática (m_1) e a segunda pesagem com os provetes fora de água extraindo-se a massa saturada (m_2) num sistema como o da Figura 5.20.



Figura 5.20: Sistema para pesagem hidrostática

Com os valores anteriores e com base na equação 5.2 e 5.3 extraíram-se valores pretendidos.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_0}{m_2 - m_1} * 10^3 \quad (5.2)$$

Em que ρ representa a massa volúmica da amostra em Kg/m³ e V representa o volume total da amostra. Para a porosidade aberta a determinação da porosidade aberta:

$$P_{ab} = \frac{v}{V} = \frac{m_2 - m_0}{m_2 - m_1} * 100 \quad (5.3)$$

Em que v representa o volume de vazios.

5.12 Ensaio de capilaridade

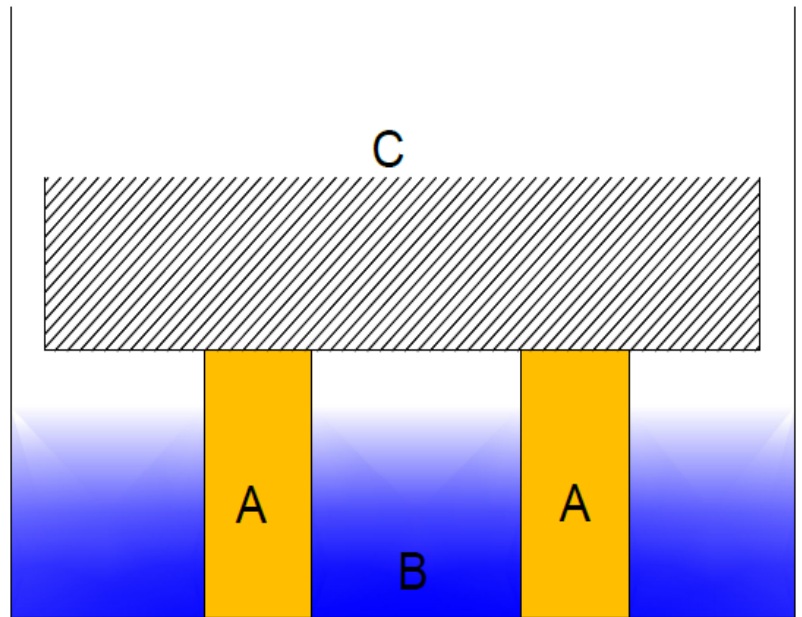
Os ensaios de capilaridade realizaram-se num sistema como ilustra a Figura 5.21 a), caracterizando-se pela capacidade de conservar as condições no interior do sistema de ensaio, com uma humidade relativa de aproximadamente 100%, permitir a medição constante da temperatura, garantir um nível de água constante e assegurar a realização de pesagens, sem a necessidade de abrir a tampa.

Para o efeito, a tampa da caixa dispõe de furos através dos quais passa um fio para a pesagem do material a ensaiar e que pode ser tapado entre pesagens, minimizando a alteração da humidade relativa no interior. Para assegurar a humidade relativa elevada, colocou-se um tabuleiro metálico representado pela letra C na Figura 5.21 b) sobre dois suportes representados pela letra A e adicionou-

se água até perto da altura do tabuleiro, como é apresentado pela letra B. Dentro de água foi colocado um termómetro para registar a temperatura do sistema durante o ensaio.



a)



b)

Figura 5.21: Sistema de ensaio para ensaios de capilaridade

No fundo da caixa metálica, colocou-se uma rede plástica para que os provetes tivessem sempre contacto com a água. Para garantir que o nível de água dentro da caixa metálica se mantinha constante e com aproximadamente 2 mm, colocou-se um recipiente com água furado ao nível que se pretendia manter a água.

Para possibilitar a pesagem dos provetes, a caixa é provida de rodas, permitindo a sua deslocação sob uma estrutura que serve de base a uma balança da marca ADAM modelo FFP-720LL, com uma precisão de 1mg. Este modelo dispõe de um sistema de pesagem na parte inferior da balança, o que permitiu a pesagem dos provetes pelos orifícios.

Os provetes preparados, foram colocados numa estufa a $60 \pm 5^\circ\text{C}$ até que a diferença entre pesagens sucessivas num intervalo de 24h fosse inferior a 0,1% da massa do provete. Posteriormente, foram postos num exsiccador para arrefecerem até à temperatura ambiente e pesados, obtendo-se a massa (m_0).

Seguidamente, foram pintados em todas as faces laterais com resina acrílica e, novamente, colocados numa estufa a $60 \pm 5^\circ\text{C}$ até que a diferença entre pesagens sucessivas, num intervalo de 24h, fosse inferior a 0,1% da massa do provete. Findo este tempo, foram retirados da estufa e colocados num exsiccador com sílica gel no fundo a arrefecer e pesados em seguida. Logo após, foi-lhes preso um fio para que a pesagem pudesse ser realizada durante o ensaio sem nunca haver a necessidade de abrir a caixa.

Começou-se o ensaio após a preparação e pesagem do primeiro provete (massa do provete + massa da resina + massa do fio), representando este valor a massa inicial (m_1) em seguida, introduziu-se dentro de água, registando-se neste momento o tempo zero. Passado 30 segundos, o segundo provete já tinha sido pesado e colocado dentro de água. O processo repetiu-se até que estivessem os 9 provetes na camada de água. Realizaram-se pesagens aos 5min, 10min, 15min, 30min, 1h, e de hora em hora, registando-se os resultados. Foram escolhidos estes tempos em vez dos impostos pela ficha 06 [12], pois como não havia conhecimento do comportamento do material, a primeira fase de absorção poderia ser muito rápida, o que impossibilitaria a extração de valores. Contudo, como em alguns casos se estava a tentar caracterizar o interface, os tempos foram ajustados com o decorrer do ensaio para que desta forma se acompanhasse a evolução da água nessa zona.

Neste ensaio registam-se as massas dos provetes aos tempos pré-definidos e, para cada um destes valores calcula-se a quantidade de água absorvida

$$m_i = \frac{m_2 - m_1}{S} \quad (5.4)$$

m_i : massa de água absorvida (Kg/m^2);

m_2 : massa obtida para os provetes nos tempos definidos para cada ensaio (inclui a massa da película aderente e do fio em Kg);

m_1 : massa obtida para os provetes antes de serem colocados em água (inclui a massa da película aderente e do fio em Kg);

S: área em contacto com a camada de água (m^2).

Para os valores obtidos, torna-se possível traçar um gráfico, em que em abcissas é colocado \sqrt{t} (s) e em ordenadas o valor da massa de água absorvida. Quando se traça este gráfico, obtém-se numa fase inicial um alinhamento recto ascendente. O coeficiente angular deste segmento de recta corresponde ao coeficiente de absorção por capilaridade, sendo este expresso em $\text{kg}/\text{m}^2.\text{s}^{1/2}$. Progressivamente passa a assumir um formato curvo, reduzindo gradualmente até que assume uma forma horizontal, representando nesta fase o estado de saturação do provete, isto é, a altura em que este não absorve mais água por capilaridade.

5.12.1 Ensaio de capilaridade em material de enchimento de paredes

Para o estudo da capilaridade do material de enchimento de paredes de alvenaria de três panos, o sistema de ensaio foi instalado tal como descrito no sub-capítulo 5.11. No entanto, para conseguir realizar o ensaio de capilaridade com precisão, o ensaio decorreu com pesagem em contínuo com o provete sempre ligado à balança e dentro de uma linha de água com aproximadamente 5mm tal como ilustra a Figura 5.22.

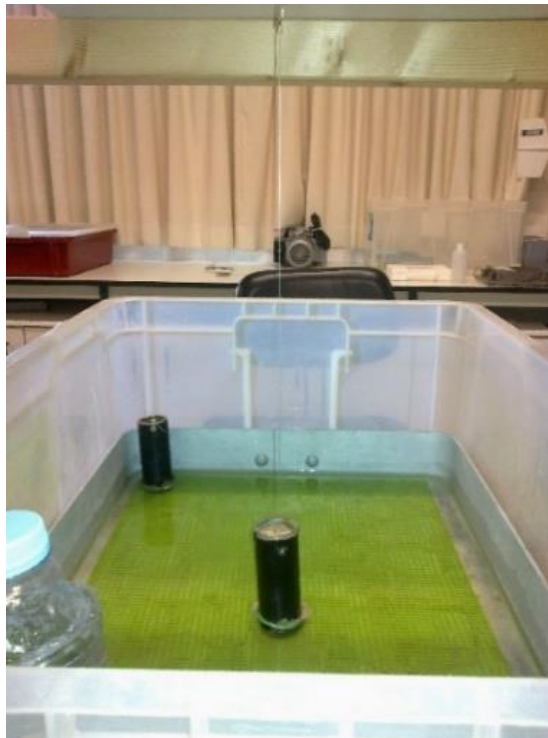


Figura 5.22: Ensaio de capilaridade em material de enchimento de paredes

Como a pesagem é feita sempre com o provete dentro de água, foi necessário subtrair a todos os provetes a impulsão hidrostática correspondente aos 5mm do provete que estava submerso.

5.12.2 Ensaio de capilaridade com sentido horizontal

O comportamento de um corpo poroso à ascensão capilar de água não é uniforme, ou seja, tem zonas onde é mais rápida e outras onde é mais lenta, registando-se um perfil de humedecimento não uniforme. Para além disso a fonte de água pode ser variável e o material estar sujeito numa determinada zona a humedecimento lateral. Assim, foi concebido um sistema de ensaio como o da figura 5.23 que permitisse à água subir pela argamassa e em seguida assumir um fluxo horizontal, no sentido da pedra ou tijolo.

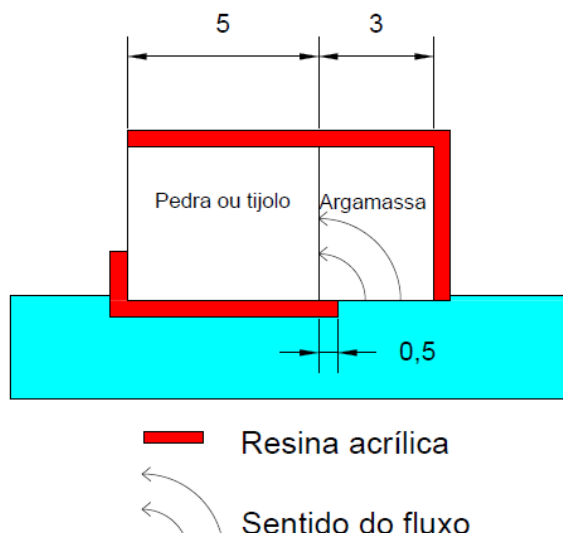


Figura 5.23: Esquema do fluxo de água nos provetes mistos horizontais

Os provetes de pedra e de tijolo utilizados, foram os mesmos dos ensaios de capilaridade nas pedras e tijolo pelo facto de já estarem correctamente caracterizados e, como tal, permitirem comparar as diferenças que residem entre a ascensão na vertical e na horizontal.

Foi decidido usar uma área de contacto da argamassa com a água com as dimensões 2,5x4 (cm) e por forma a evitar qualquer migração de água pelo interface, aplicou-se uma banda de impermeabilização com 0,5cm para lá do interface.

5.12.3 Ensaio de ciclos de absorção por capilaridade para diferentes teores de água

Para a realização do presente ensaio, foram cortadas amostras de calcário amarelo e de tijolo com as dimensões 4x4x5 (cm) e o ensaio seguiu as indicações do sub-capítulo 5.11. Como o presente ensaio foi estabelecido para determinar de que forma a ascensão por capilaridade variava para diferentes graus de saturação da amostra, escolheram-se valores iniciais e finais do teor água, com base nas curvas de absorção capilar do tijolo e do calcário amarelo, optando-se por intervalos que permitissem descrever uma gama alargada de valores, para estudar o comportamento capilar ao longo dos diferentes graus de saturação, como apresentado na tabela 5.5.

As amostras foram colocadas em contacto com 2mm de água durante um intervalo de tempo tal, que o teor em água atingisse o valor pré-estabelecido (Teor de água inicial), sendo posteriormente retiradas e envoltas em película durante 24h por forma a minimizar as condições de evaporação. Decorridas as 24h foram novamente colocadas nas mesmas condições de absorção e registou-se a nova curva de absorção capilar até aos novos valores (Teor de água final). O processo foi repetido para diferentes teores, sendo a curva de ascensão capilar sempre registada.

Tabela 5.5: Teor de água dos ensaios de ciclos de absorção capilar para diferentes teores de água

	Teor de água inicial (%)	Teor de água final (%)
Calcário amarelo	0,7	2,5
	2,2	3,3
	2,4	4
Tijolo	8	20
	14	17
	19	22

5.12.4 Ensaios Mistos de interface simples

Com o decorrer dos anos, a passagem de água e o crescimento de plantas que se alojam nas paredes, leva a que gradualmente, as juntas entre as pedras fiquem deterioradas, resultando num interface com maiores vazios. Para além deste ponto, existem casos em que as paredes de alvenaria eram construídas com o encosto das pedras entre si originando um interface muito irregular. Deste modo, o ensaio foi realizado em duas fases:

- Contacto entre dois materiais distintos, usando-se amostras secas de tijolo ou calcário amarelo na metade superior (capilaridade com o meio saturado em argamassa);
- Materiais iguais sobrepostos (Capilaridade com materiais idênticos).

Para perceber de que forma a água ascende pelos materiais nestas condições, foi concebido um método de ensaio como descrito no presente sub-capítulo. Os materiais utilizados, foram o tijolo e o calcário amarelo e cortados com as dimensões 4x4x5 (cm) assegurando-se a planeza das superfícies de contacto lixando-as com lixa de água em movimentos circulares.

A preparação do sistema de ensaio seguiu a metodologia definida no sub-capítulo 5.11. Já a preparação dos provetes teve de ser ligeiramente ajustada por forma a não haver qualquer interferência entre as superfícies. Deste modo, foi aplicada uma nova camada de resina nas faces laterais dos provetes a ensaiar (secos), sendo-lhe embutido um fio lateralmente para realizar as pesagens sem afectar a transferência de água no interface. No final deste processo, os provetes foram novamente colocados numa estufa a $60 \pm 5^\circ\text{C}$ até que a diferença entre pesagens sucessivas num intervalo de 24h fosse inferior a 0,1% da massa do provete.

Numa primeira fase do ensaio, colocou-se o meio que se pretendia saturar a absorver água por capilaridade numa camada de água de 2mm, durante três dias. Deste modo, quando o meio seco fosse colocado por cima deste, iniciar-se-ia de imediato o fenómeno de capilaridade, pois havia a certeza de que a água estava no interface. Findo este período, foram colocados sobre eles, os provetes que se pretendiam analisar (secos), realizando-se pesagens na primeira meia hora e de hora a hora durante o primeiro dia. Daí em diante, foram realizadas pesagens de 24 em 24h. A Figura 5.24 ilustra o sistema de ensaio logo após o material seco ser colocado sobre o material saturado.



Figura 5.24: Ensaio de capilaridade com encosto das faces dos provetes

6 Análise e discussão de resultados

6.1 Ensaio de porosidade

A tabela 6.1 apresenta os valores da porosidade aberta, obtidos pelo processo descrito no capítulo 5.10.1. Ao mesmo tempo, são também apresentados os valores obtidos pelo MIP, não sendo apresentado para este, valores do desvio padrão, pois realizou-se apenas um ensaio por amostra.

Tabela 6.1: Porosidade aberta obtida pelo MIP e pelo método de pesagem hidrostática

Identificação		Poros. Aberta	Desv. Padrão	Poros. Aberta MIP
		[%]	[%]	[%]
Calcário amarelo	I	12	0,7	15,4
Calcário branco	H	7	0,2	7,6
Granito	J	6	0,1	11,1
Tijolo	K	39	0,5	41,5
Argamassa de cal aérea	CL	24	0,7	34,3
Argamassa de cal hidráulica	NHL	26	3,0	26,9

Os resultados obtidos pelo MIP são relativamente superiores, especialmente quando é ensaiado material frágil ou já muito alterado. Tal deve-se às pressões relativamente elevadas necessárias para conseguir injectar o mercúrio nos poros de pequenas dimensões.

6.2 Ensaios de porometria com recurso ao MIP

6.2.1 Intrusão incremental de mercúrio

Granito e calcários

As curvas de intrusão incremental de mercúrio são resultado do acumulado da quantidade de mercúrio que preenche os poros para cada patamar de diâmetro de poros, apresentando em abcissas o valor do diâmetro dos poros e em ordenadas, o volume de mercúrio intrudido. Desta forma, para cada diâmetro de poro, é possível comparar qual a amostra que tem um maior volume de poros dessa dimensão. Embora intuitivo, dada a complexidade dos gráficos, não é possível colocar todas as curvas no mesmo gráfico, agrupando-se os gráficos por proximidade de valores. A Figura 6.1 ilustra as curvas de intrusão incremental de mercúrio do granito e dos calcários. É possível constatar que o granito apresenta maior quantidade de poros com dimensões acima $0,72\ \mu\text{m}$ enquanto que os calcários apresentam um maior volume de poros de dimensões abaixo de $0,72\ \mu\text{m}$, sendo o calcário branco aquele que apresenta poros mais finos, com grande parte deles na gama de micróporos não permitindo que a água ascenda por capilaridade.

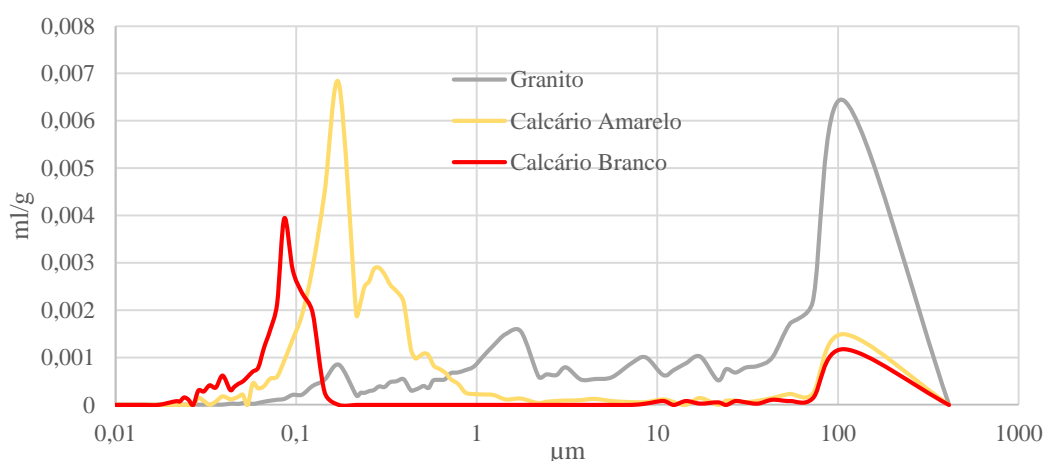


Figura 6.1: Curvas de intrusão incremental de mercúrio do granito e dos calcários

Tijolo

A Figura 6.2 ilustra a curva de intrusão incremental de mercúrio do tijolo isoladamente, de onde se conclui que o maior volume de poros tem diâmetros de $1,62\ \mu\text{m}$ e que a maior parte dos poros têm diâmetros abaixo deste valor.

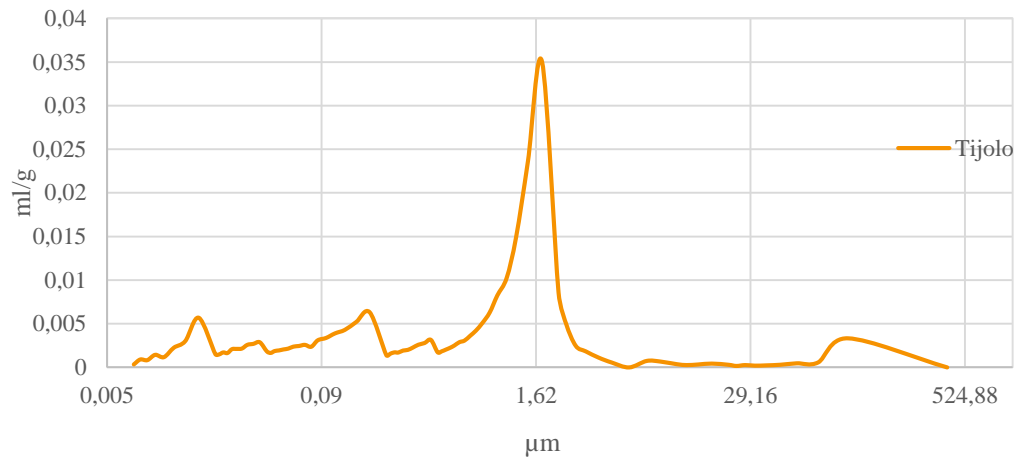


Figura 6.2: Curva de intrusão incremental de mercúrio do Tijolo

Argamassas

As curvas de intrusão incremental de mercúrio apresentadas na figura 6.3 ilustram as argamassas de cal aérea e de cal hidráulica. Existe uma grande proximidade de valores entre elas, contudo, a cal aérea é aquela que apresenta um maior volume de poros com diâmetros acima de 43 μm.

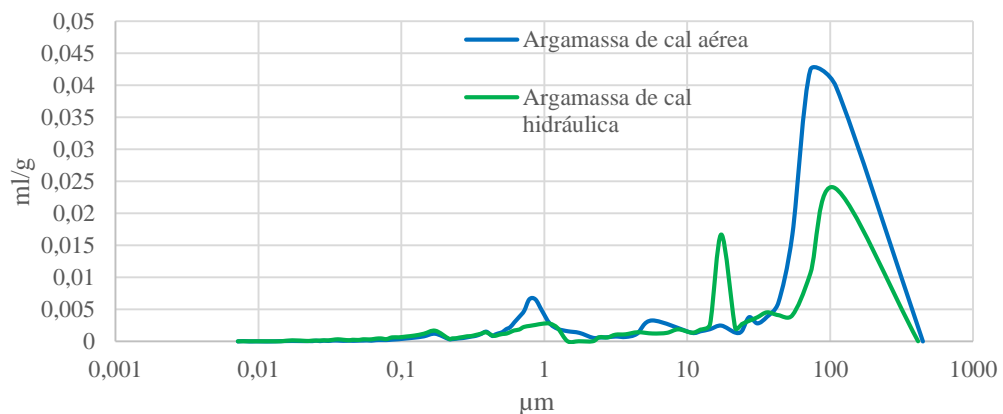


Figura 6.3: Curvas de intrusão incremental de mercúrio das argamassas de cal aérea e de cal hidráulica

Material de enchimento de paredes

A análise da porometria sobre os materiais de enchimentos de paredes, revelou uma grande diferença entre amostras devido ao material de enchimento não ser uniforme e variar em função da zona e do tipo de edifício. Na Figura 6.4 são apresentadas as amostras de Castelo Branco, Alvaiázere cal e Alvaiázere terra.

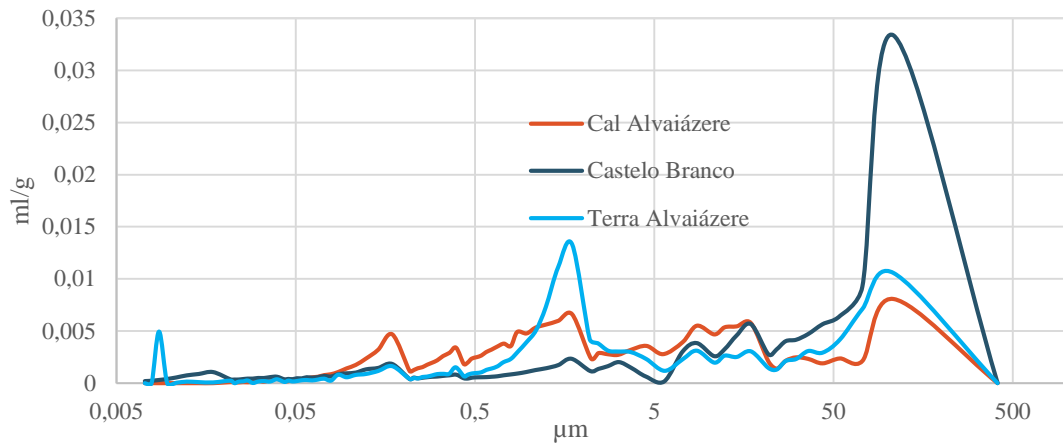


Figura 6.4: Curvas de intrusão incremental de mercúrio do material de enchimento de paredes

6.2.2 Curvas de intrusão e extrusão cumulativa de mercúrio

Como referido por Collet [3], as curvas de intrusão e extrusão cumulativa do mercúrio, permitem determinar o tipo de poros presentes em cada material analisado. A análise foi feita para pressões acima de 0,15MPa, uma vez que, abaixo deste valor o material se encontra ainda em vácuo consequência do ensaio do MIP. As curvas do granito são apresentadas na Figura 6.5 onde se observa uma curva de intrusão ascendente e em seguida uma entrada em patamar. Quando se inicia a extrusão, a curva mantém-se em patamar, seguindo-se uma fase descendente comportamento semelhante registou o calcário amarelo Figura 6.6, a argamassa de cal aérea Figura 6.7 e a argamassa de cal hidráulica Figura 6.8.

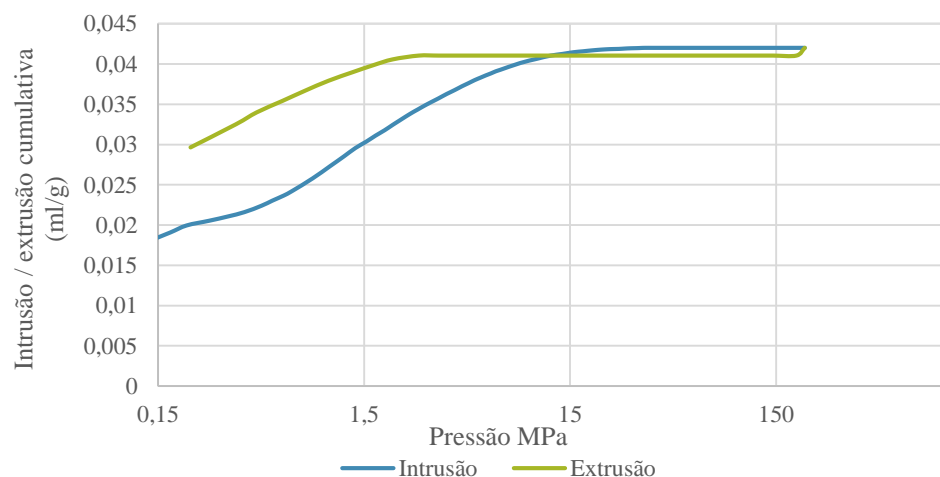


Figura 6.5: Curvas de intrusão e extrusão cumulativa de mercúrio do granito

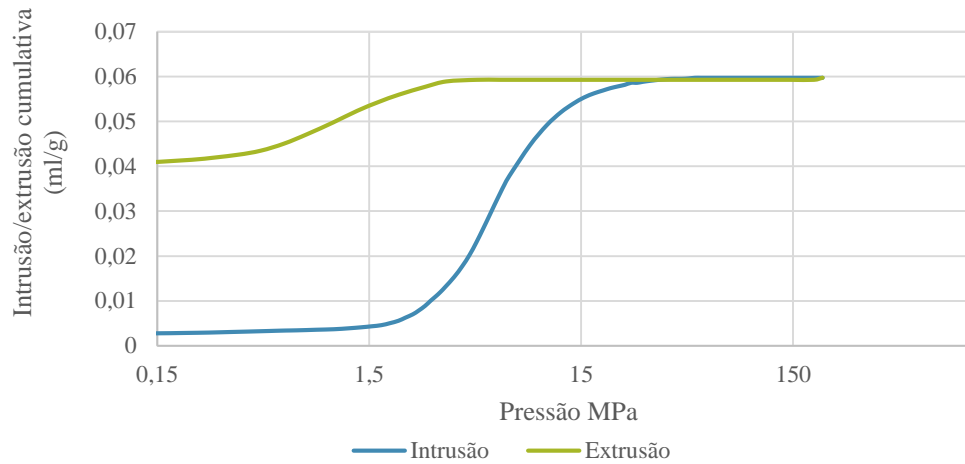


Figura 6.6: Curvas de intrusão e extrusão cumulativa de mercúrio do calcário amarelo

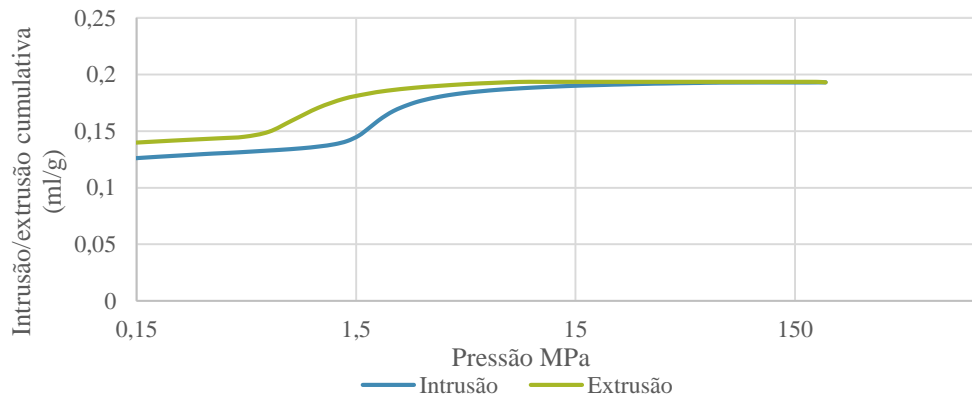


Figura 6.7: Curvas de intrusão e extrusão cumulativa de mercúrio da argamassa de cal aérea

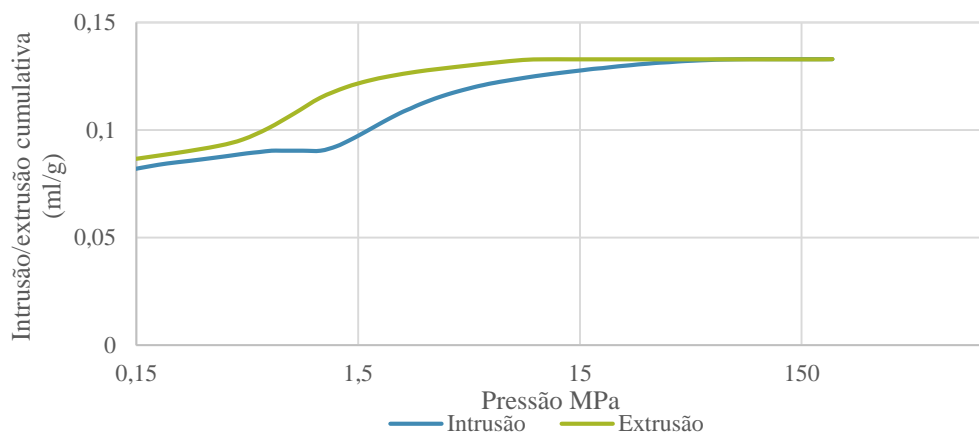


Figura 6.8: Curvas de intrusão e extrusão cumulativa de mercúrio da argamassa de cal hidráulica

A observação da curva de intrusão e extrusão cumulativa de mercúrio, ilustrada na Figura 6.9 permite constatar que o tijolo apresenta um comportamento diferente dos materiais anteriores. Na fase de intrusão, a curva segue uma tendência ascendente reduzindo o seu declive na parte final sem nunca ter uma fase de patamar. Quando se inicia a extrusão a curva reduz a pressão em patamar e só em seguida decresce.

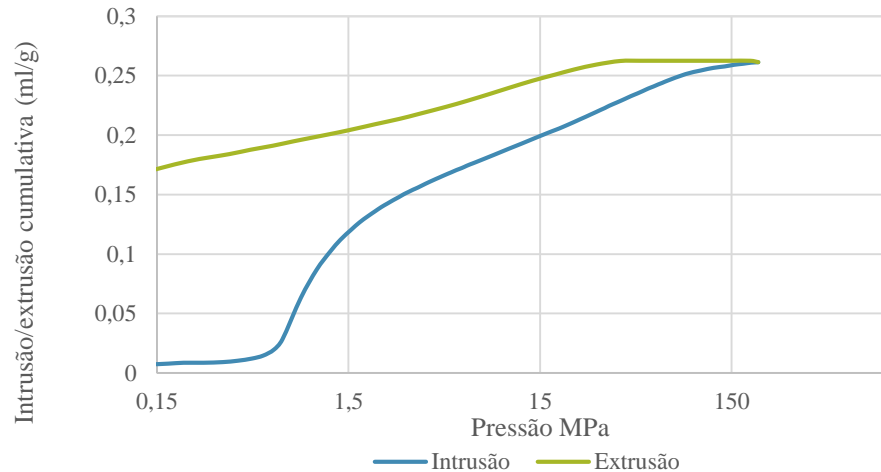


Figura 6.9: Curvas de intrusão e extrusão cumulativa de mercúrio do tijolo

É de referir que como o número de patamares de extrusão é inferior aos de intrusão, as curvas de extrusão cumulativa de mercúrio reais podem diferir face às apresentadas, não sendo portanto correcto fazer uma analogia que permitisse limitar os poros em cilíndricos, esféricos, agulhas ou rods.

6.3 Ensaios de capilaridade

No presente sub-capítulo, são apresentados os gráficos e tabelas que descrevem a ascensão capilar dos materiais de forma isolada. Ao mesmo tempo, foram relacionados com os ensaios de porometria para compreender, se a gama de diâmetros de poros de cada material afecta, e de que modo, o comportamento capilar.

6.3.1 Pedras e tijolo

Neste ponto a análise debruçou-se sobre o comportamento capilar de:

- Calcário branco;
- Calcário amarelo;
- Tijolo;
- Granito.

Calcários

As curvas de absorção capilar do calcário amarelo e do calcário branco registaram nos primeiros 20 s^{1/2} do ensaio, um coeficiente de absorção capilar acentuado, reduzindo para valores

constantes a partir desse instante como se observa na Figura 6.10. Do mesmo modo, a mesma constatação pode ser feita na figura 6.11 mas em função da sorptividade.

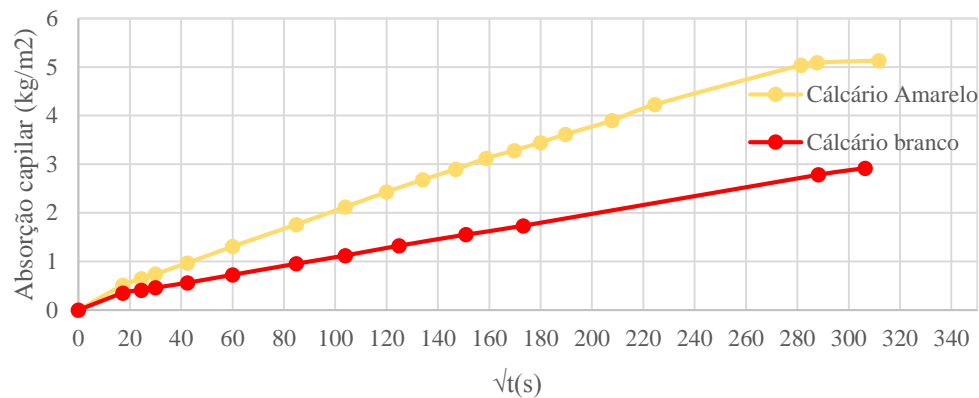


Figura 6.10: Ensaio de absorção capilar nas amostras de calcário amarelo e calcário branco (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo)

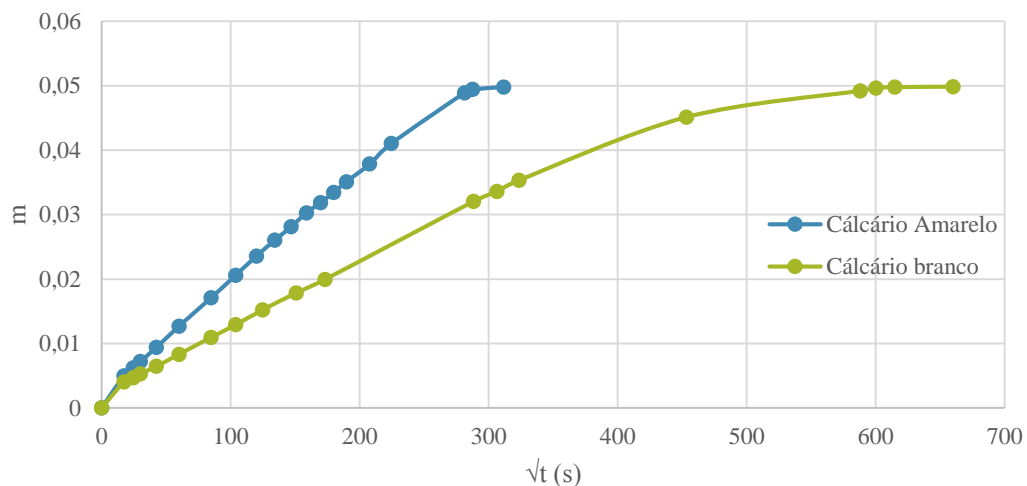


Figura 6.11: Ensaio de absorção capilar nas amostras de calcário amarelo e calcário branco (avanço da coluna de água em função do tempo)

Uma análise conjunta destes resultados com os do MIP e com o ensaio de porosidade, permitiu constatar que a amostra de calcário branco tem uma porosidade aberta de 7% e grande parte do volume de poros encontra-se abaixo dos $0,123\mu\text{m}$ (cerca de 83%). Como apresentado por Reddy [28] a capilaridade não se processa para diâmetros capilares abaixo de $0,1\mu\text{m}$ e, como tal, a maioria dos poros do calcário branco não contribui para a capilaridade restando uma reduzida percentagem da porosidade aberta que permita a migração de água no material. Tal, justifica o reduzido coeficiente de absorção capilar de $0,009 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}^{1/2}$ e ao mesmo tempo uma menor sorptividade face ao calcário amarelo. Por este motivo, o calcário branco não foi analisado no restante trabalho.

O calcário amarelo registou uma absorção capilar consideravelmente superior ao calcário branco, com um coeficiente de absorção capilar de $0,018 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}^{1/2}$ e um valor de sorptividade de $0,00018 \text{ m/s}^{1/2}$. Tal acréscimo deveu-se à porosidade aberta na ordem de 12%, e à rede porosa que

contribui para a ascensão capilar (poros superiores a $0,1\mu\text{m}$ e inferiores a $1000\mu\text{m}$) representar um total de 87% dos poros.

Tijolo

A curva de absorção capilar do tijolo da Figura 6.12 permitiu identificar um comportamento praticamente linear ao longo de todo o ensaio, até se dar uma estabilização correspondendo ao instante em que a amostra se encontrava saturada tal como observado na figura 6.13 com o avanço da coluna de água em função do tempo estabilizando para a altura do provete de 5cm.

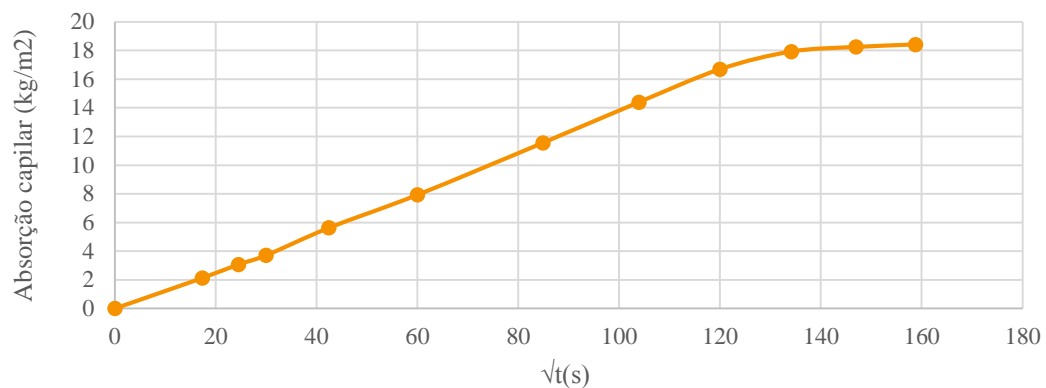


Figura 6.12: Ensaio de absorção capilar nas amostras de Tijolo (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo)

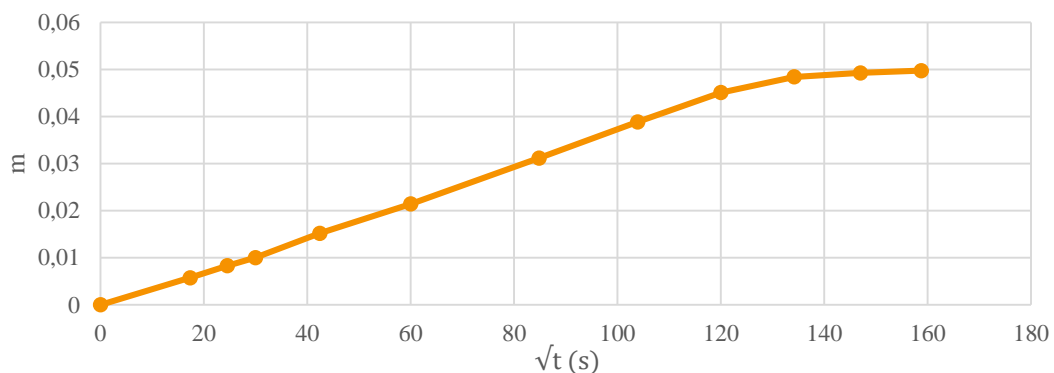


Figura 6.13: Ensaio de absorção capilar nas amostras de Tijolo (avanço da coluna de água em função do tempo)

Dado o valor de porosidade aberta to tijolo (39%) e ao mesmo tempo, a grande rede de poros capilares (74%) extraídos do MIP, o coeficiente de absorção capilar registado foi superior às pedras analisadas, com um valor de $0,157 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ e uma sorptividade de $0,00039 \text{ m/s}^{1/2}$.

Granito

O ensaio de absorção capilar do granito foi de entre todos os materiais ensaiados anteriormente, aquele que demorou menos tempo e registou um coeficiente de absorção capilar de $0,035 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ e uma sorptividade de $0,00058 \text{ m/s}^{1/2}$. Sendo a curva de absorção capilar apresentada na Figura 6.14 e a do avanço da coluna de água em função do tempo na figura e 6.15.

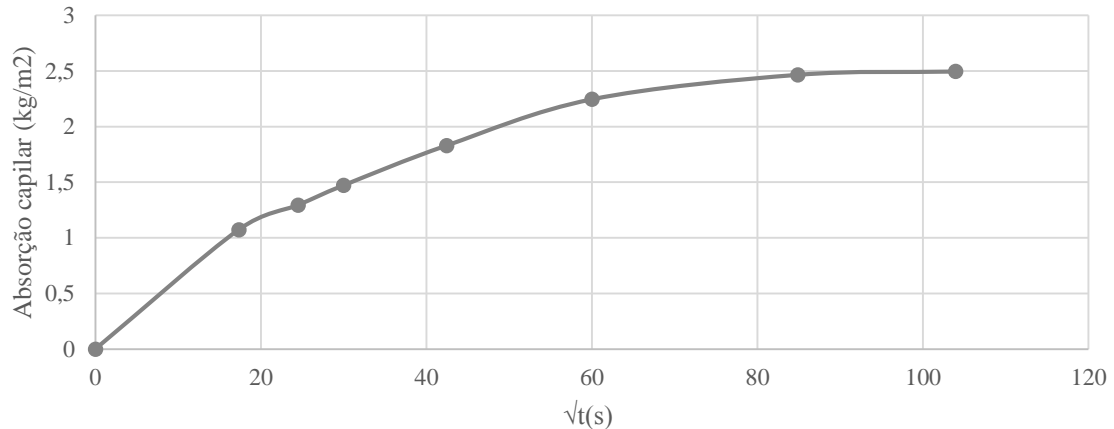


Figura 6.14: Ensaio de absorção capilar nas amostras de granito (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo)

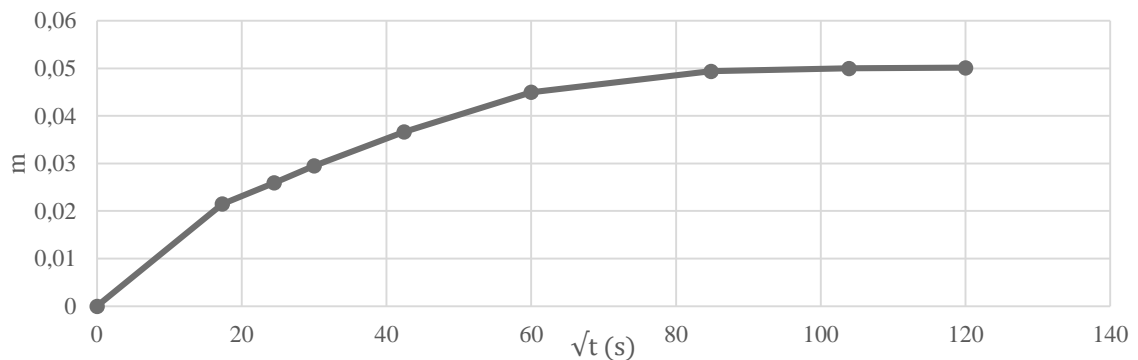


Figura 6.15: Ensaio de absorção capilar nas amostras de granito (avanço da coluna de água em função do tempo)

O granito analisado encontrava-se bastante alterado e com inúmeras diaclases (fracturas). Embora o coeficiente de absorção capilar do granito seja reduzido quando comparado com os restantes materiais analisados, a sua velocidade de ascensão é muito elevada, tal deve-se à migração da água pelas fendas no interior do material. Acresce ainda o facto, de apenas 2% dos poros terem um diâmetro inferior a $0,123 \mu\text{m}$, significando isto, que a rede porosa contribui quase na totalidade para a ascensão capilar. Alguns ensaios de ascensão capilar nas amostras de granito processaram-se quase instantaneamente, inviabilizando as pesagens. Como tal, decidiu-se nestes casos excluir o granito.

Para permitir comparação dos comportamentos de todos os materiais atrás expostos, optou-se pela sua inclusão no mesmo gráfico na figura 6.16 e na figura 6.17 permitindo comparar os coeficientes de absorção capilar e as sorptividades dos materiais entre si. Não se pretende com isto, visualizar a evolução do material em pormenor, mas sim, as grandes diferenças que os materiais têm entre si. Os

valores dos coeficientes de absorção capilar das pedras e do tijolo são apresentados na tabela 6.2 bem como os valores de sorptividade. Destes Pode-se concluir que a absorção capilar é mias rápida em amostras que apresentem maior volume de poros com maiores dimensões na medida em que, tal como apresentado por Rato[27] a água penetra primeiro nos poros de maiores dimensões e só de seguida nos de menores dimensões. Este comportamento é regular excepto no caso do granito dado o seu elevado grau de detioração.

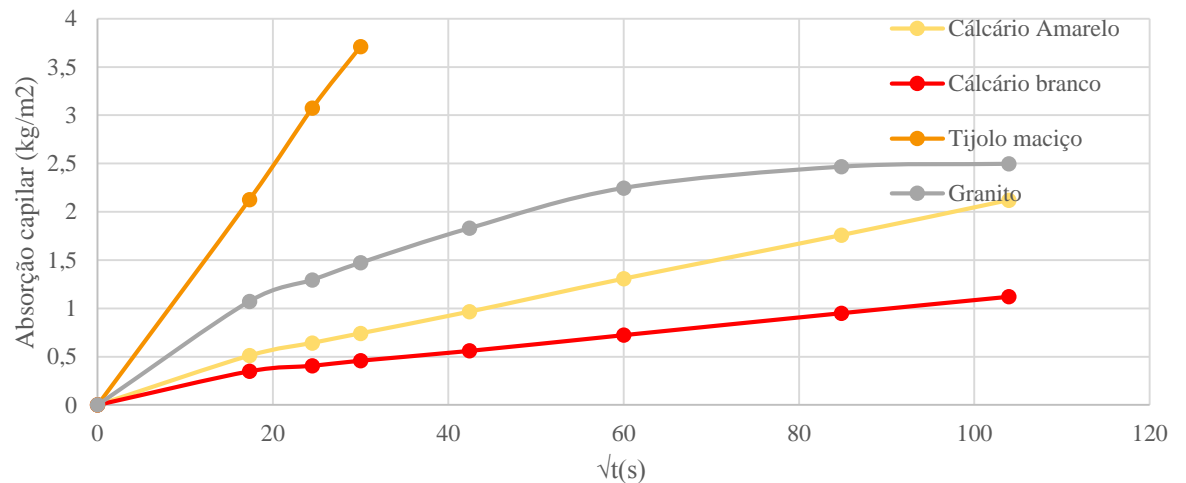


Figura 6.16: Ensaio de absorção capilar nas amostras das pedras e do tijolo (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo)

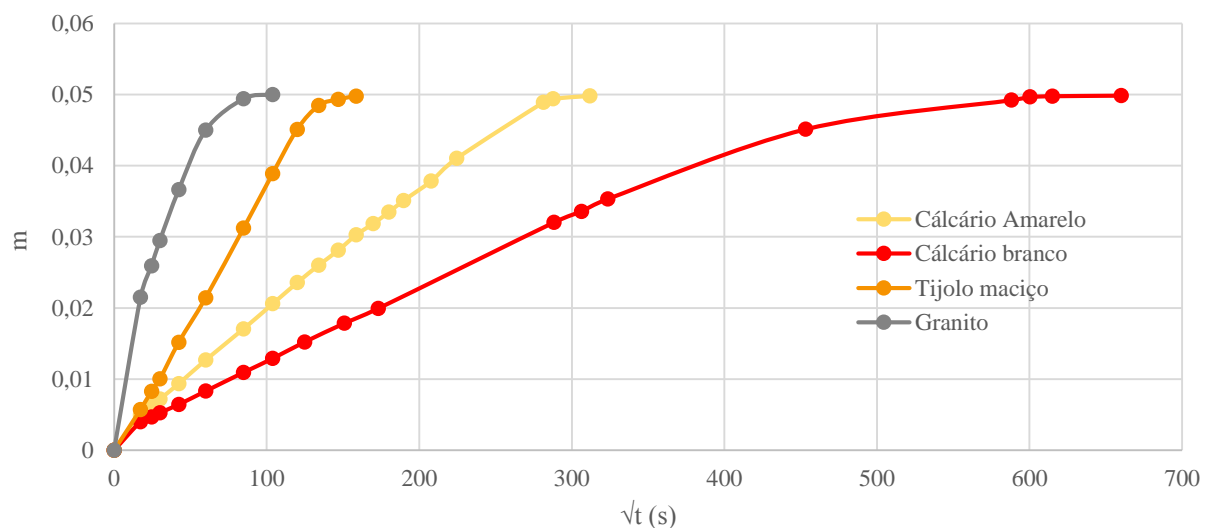


Figura 6.17: Ensaio de absorção capilar nas amostras das pedras e do tijolo (avanço da coluna de água em função do tempo)

Tabela 6.2: Coeficientes de absorção capilar das pedras e do tijolo

Material	Coeficiente de absorção capilar ($\text{Kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$)	Sorptividade ($\text{m/s}^{1/2}$)
Calcário Amarelo	0,018	0,00018
Calcário Branco	0,009	0,00011
Tijolo	0,157	0,00039
Granito	0,035	0,00058

6.3.2 Argamassas

Os ensaios de capilaridade decorreram tal como descrito no sub-capítulo 5.11, obtendo-se os gráficos das Figura 6.18 e Figura 6.19, ilustrativos da evolução do coeficiente de absorção capilar das argamassas e do avanço da coluna de água em função do tempo respectivamente. Os valores do coeficiente de absorção capilar são apresentados na tabela 6.3 bem como os de sorptividade.

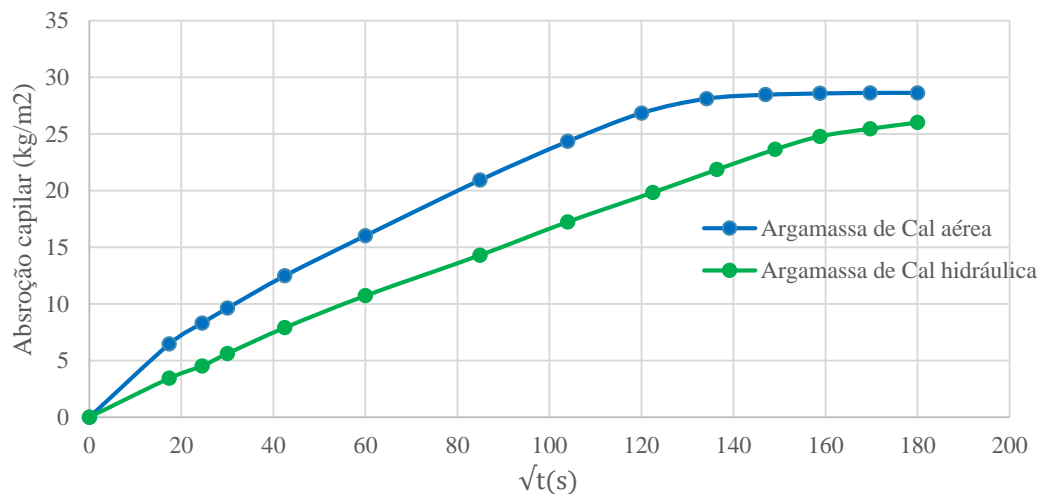


Figura 6.18: Ensaio de absorção capilar nas amostras de argamassa de cal aérea e cal hidráulica (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo)

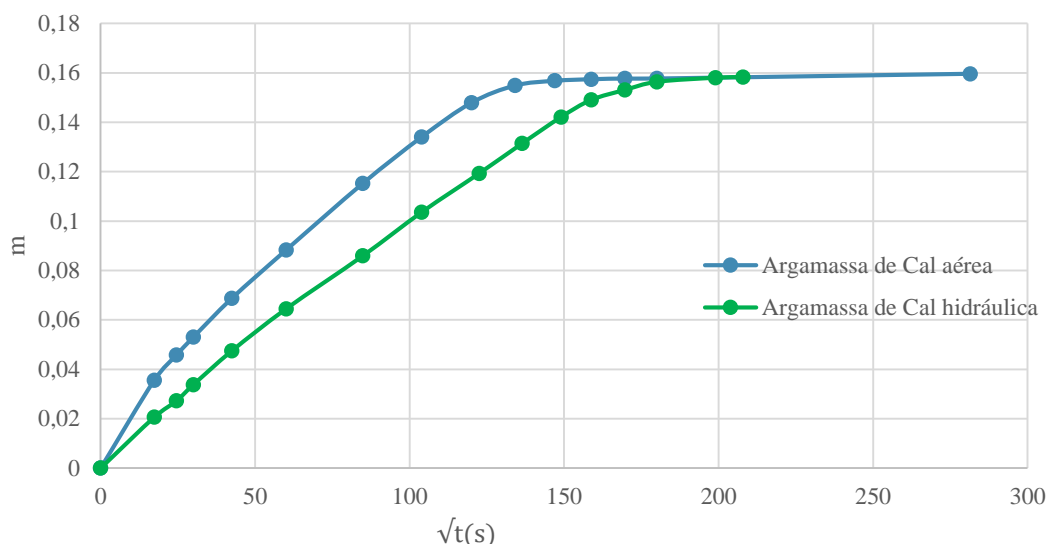


Figura 6.19: Ensaio de absorção capilar nas amostras de argamassa de cal aérea e cal hidráulica (avanço da coluna de água em função do tempo)

Tabela 6.3: Coeficientes de absorção capilar das argamassas

Material	Coeficiente de absorção capilar ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$)	Sorptividade ($\text{m/s}^{1/2}$)
Argamassa cal aérea	0,209	0,0012
Argamassa cal hidráulica	0,158	0,0011

Como apresentado na tabela 6.1 os ensaios de porosidade aberta sobre a argamassa de cal aérea e cal hidráulica, registaram valores na ordem de 24% e de 26% respectivamente. Conjugando estes ensaios com os obtidos pelo porosímetro de mercúrio presentes na Figura 6.3, constata-se que ambos os materiais têm uma rede de poros na sua maioria com diâmetros acima de $0,1\mu\text{m}$, representando uma vasta rede de poros capilares, o que justifica o coeficiente de absorção capilar superior face às pedras e ao tijolo.

No entanto, existe uma diferença nos coeficientes de absorção capilar sendo superior na argamassa de cal aérea. Tal deve-se ao facto da argamassa de cal aérea, apresentar um maior volume de poros de grandes dimensões e o valor da porosidade ser aproximado, sendo assim o volume de água absorvida foi maior, representado uma maior massa de água absorvida e consequentemente um maior coeficiente absorção capilar. Contudo a sorptividade é semelhante e superior á do tijolo e das rochas. A justificação reside no facto as argamassas apresentarem um maior volume de poros de maiores dimensões.

6.3.3 Ensaio de capilaridade sobre material de enchimento de paredes

Quando se ensaiou o material de enchimento, constatou-se que mesmo havendo um grande afastamento geográfico entre as amostras recolhidas, algumas apresentavam semelhanças no comportamento capilar. Deste modo, para evidenciar essas semelhanças, os gráficos de absorção capilar foram agrupados por proximidade.

Alvaiázere (cal) e Almada (Cão)

A Figura 6.20 ilustra o comportamento capilar das amostras Alvaiázere (cal) e Almada – Costas do Cão. Até ao instante $5\text{ s}^{1/2}$ a amostra Almada (Cão) registou um coeficiente de absorção capilar superior, seguindo-se uma redução para um valor semelhante à amostra Alvaiázere (cal) como também se pode constatar na tabela 6.4.

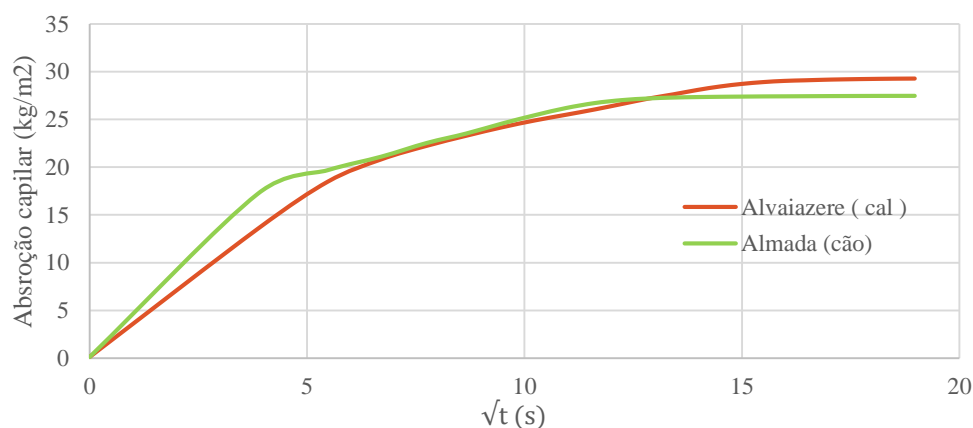


Figura 6.20: Ensaio de absorção capilar nas amostras do material de enchimento de paredes de Alvaiázere (cal) e Costas do Cão

Quando comparadas, tanto a amostra retirada da parede de Alvaiázere como a amostra retirada em Almada (Cão), apresentavam uma cor branca, justificada pela presença de cal aérea. Tal constatação partiu do facto de neste tipo de construções o enchimento ser realizado com o material que se encontrava nas imediações. Deste modo, seria expectável que fosse alaranjado, no entanto a cor observada foi branca concluindo-se que seria cal aérea o ligante utilizado para aglutinar o material e lhe conferir maior resistência. Importa ainda referir que ambas apresentavam uma consistência muito semelhante.

Castelo Branco e Portimão

Na Figura 6.21, agruparam-se as amostras de Portimão e de Castelo Branco, observando-se um comportamento muito aproximado excepto nos primeiros instantes em que a amostra de Portimão registou uma absorção mais rápida. Os valores podem ser observados na tabela 6.4.

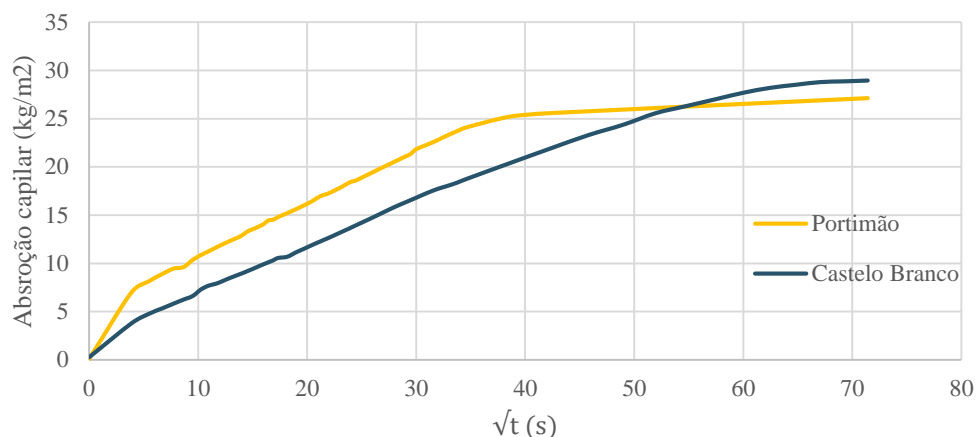


Figura 6.21: Ensaio de absorção capilar nas amostras do material de enchimento de paredes de Portimão e Castelo Branco

Uma análise visual às amostras de Castelo Branco e de Portimão, permitiu identificar uma cor alaranjada, resultado da argila ser o solo predominante de ambas as regiões.

Alvaiázere (terra) e Almada

Na Figura 6.22, estão representados os comportamentos capilares das amostras de Almada e de Alvaiázere (terra). Numa primeira fase registou-se uma absorção muito rápida para ambas as amostras, sendo a amostra de Almada aquela que absorveu uma maior quantidade de água. Seguiu-se uma fase contínua com os coeficientes muito semelhantes entre si, como se pode confirmar na tabela 6.4.

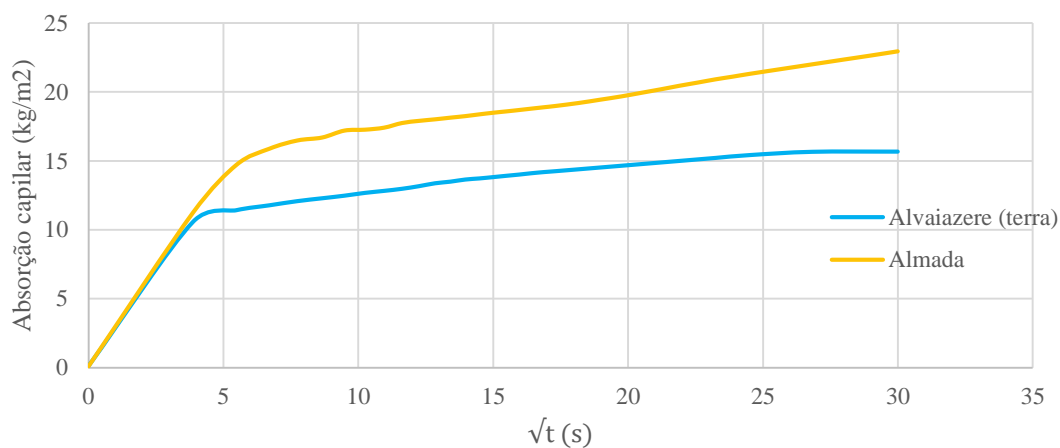


Figura 6.22: Ensaio de absorção capilar nas amostras do material de enchimento de paredes de Almada e Alvaiázere (terra)

Tabela 6.4: Coeficientes de absorção capilar do material de enchimento de paredes

Zona de extracção	Coeficiente de absorção Capilar ($\text{kg/m}^2.\text{s}^{1/2}$)
Portimão	0,84
Alvaiázere (terra)	0,35
Alvaiázere (cal)	3,33
Almada	0,37
Almada (cão)	3,74
Castelo Branco	0,86

Com base nas curvas obtidas pelo porosímetro de mercúrio da Figura 6.4, seria expectável que a amostra de Castelo Branco fosse, de entre as três, aquela que apresentasse o maior coeficiente de absorção capilar, na medida em que grande parte dos poros da amostra são de grandes dimensões. No entanto, tal não se verificou. Ao analisar-se o quadro 6.4 e complementando com a figura 6.23, a amostra de Castelo Branco surge com um coeficiente de absorção capilar inferior ao da amostra de Alvaiázere (cal), o que é incoerente com os resultados do MIP.

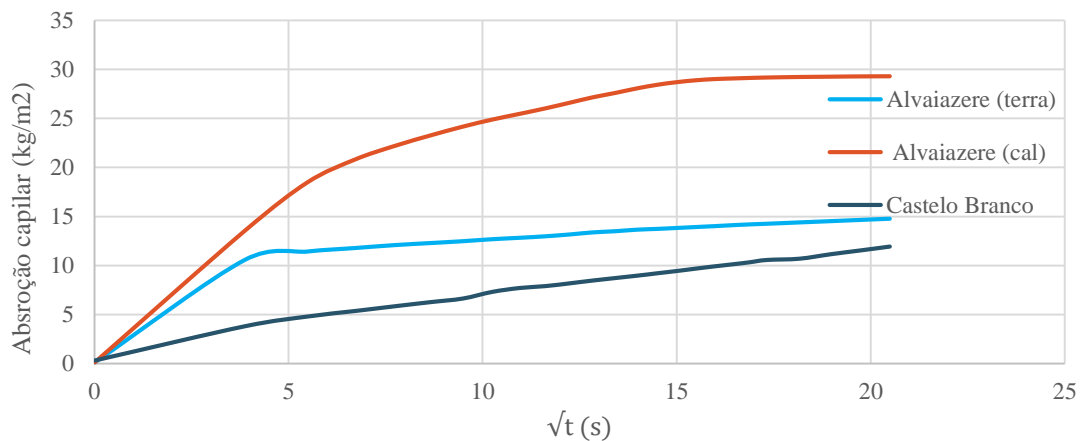


Figura 6.23: Ensaio de absorção capilar nas amostras do material de enchimento de paredes

Tal situação poder-se-á justificar pelo próprio processo do MIP. Ao usar pressões muito elevadas para caracterizar os poros de menor diâmetro e como o material em análise era muito granular, pode-se ter dado um rompimento de poros que seriam inacessíveis, alterando desta forma os resultados reais. No presente ensaio não foi possível extrair os valores de sorptividade devido ao ensaio ter sido realizado com a tampa aberta o que levou a elevadas oscilações na temperatura dos ensaios o que impossibilitava a extração de um valor correcto.

6.4 Ensaios de capilaridade em provetes mistos

Os ensaios de capilaridade em provetes mistos foram realizados primeiramente colocando a argamassa em contacto com a água e posteriormente a pedra ou o tijolo. O presente sub-capítulo pretende descrever e discutir os fenómenos observados.

6.4.1 Ensaios de capilaridade sobre provetes mistos com argamassa de cal aérea

Quando o ensaio foi realizado com a argamassa de cal aérea em contacto com a água, aproximadamente até ao instante $50 \text{ s}^{1/2}$ o ensaio registou um coeficiente de absorção capilar para todas as amostras de aproximadamente $0,200 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ coerente com o obtido nos ensaios dos provetes de argamassa de cal aérea simples tal como a sorptividade com um valor de $0,0014 \text{ m/s}^{1/2}$. Em todas as amostras, a partir deste instante observou-se um comportamento irregular. Tal leva a crer que esta zona de irregularidade é o local onde a água encontra o interface entre os materiais, estando a sua zona delimitada nos gráficos de absorção capilar a tracejado. A partir deste ponto, o coeficiente de absorção capilar e a sorptividade estabilizou entre diferentes valores consoante o material que se encontrava por cima. Para uma fácil compreensão dos dados, são apresentados em seguida os gráficos onde constam as curvas de ascensão capilar dos provetes mistos, conjuntamente com as curvas de ascensão para os materiais que o constituem, analisados isoladamente.

6.4.1.1 Ensaios mistos com o meio inferior em argamassa de cal aérea

Calcário amarelo

O comportamento da amostra composta por argamassa de cal aérea e calcário amarelo é descrito nas Figura 6.24 e figura 6.25. Aproximadamente até ao instante $50 \text{ s}^{1/2}$ a curva do material ensaiado assemelhou-se à obtida para a argamassa de cal aérea (curva a azul). Seguiu-se uma fase com um comportamento irregular, o que deu a entender que seria a zona do interface até ao instante $60 \text{ s}^{1/2}$, altura em que a curva de absorção capilar estabilizou para o coeficiente de absorção capilar de $0,016 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$, próximo do obtido para o calcário amarelo analisado isoladamente ($0,018 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$) curva a amarelo. A mesma constatação pode ser feita para os valores de sorptividade com a estabilização a dar-se para $0,00020 \text{ m/s}^{1/2}$ e o calcário amarelo isoladamente com $0,00018 \text{ m/s}^{1/2}$.

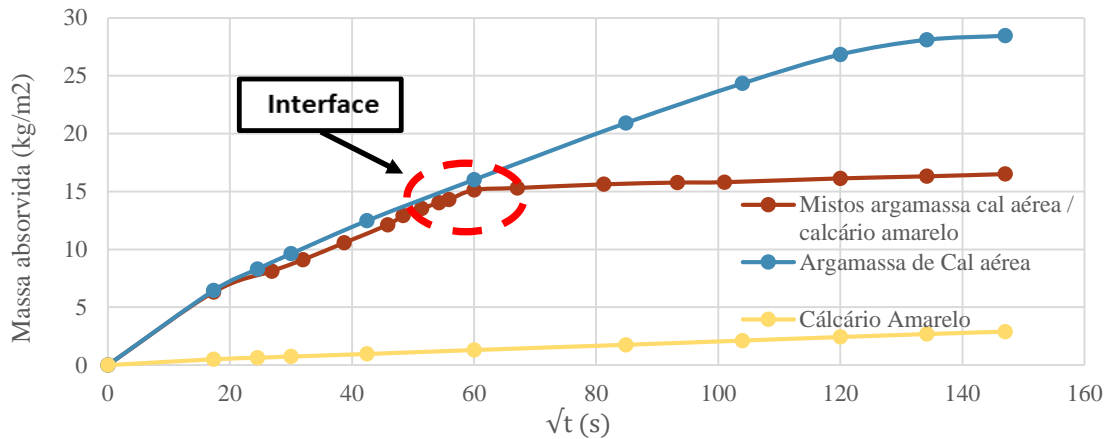


Figura 6.24: Curvas de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior em argamassa de cal aérea e superior de calcário amarelo e dos materiais em separado (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo)

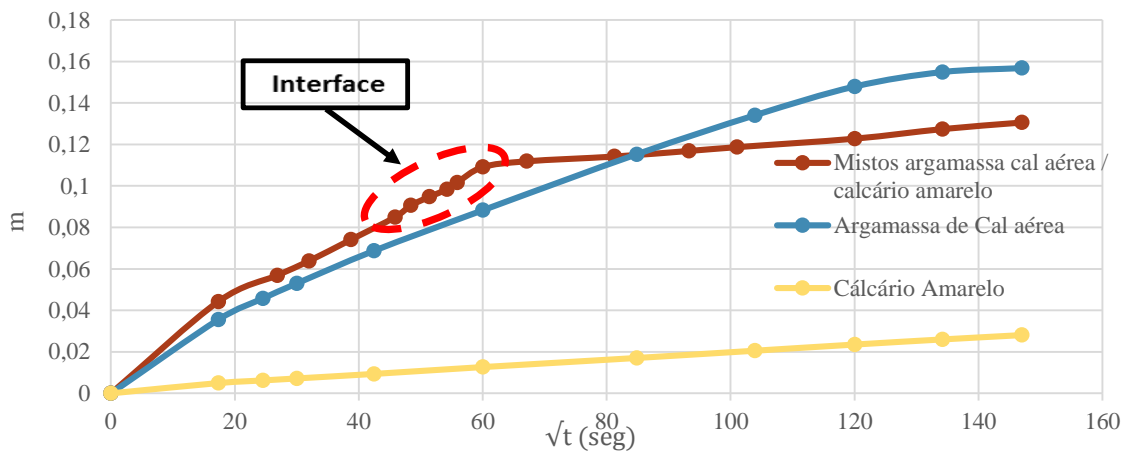


Figura 6.25: Curvas de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior em argamassa de cal aérea e superior de calcário amarelo e dos materiais em separado (avanço da coluna de água em função do tempo)

Tijolo

O ensaio realizado sobre provetes mistos de argamassa de cal aérea e de tijolo, permitiu registrar um coeficiente de absorção capilar numa fase inicial e até aproximadamente ao instante $50s^{1/2}$ próximo daquele que se obteve para a argamassa de cal aérea, como ilustra a Figura 6.26 e no caso da sorptividade como apresentado na figura 6.27. Seguiu-se uma fase com um comportamento irregular característico da zona de interface e, em seguida, a curva de absorção capilar estabilizou no valor de $0,175 \text{ kg/m}^2 \cdot s^{1/2}$ próximo do obtido para o tijolo analisado isoladamente ($0,157 \text{ kg/m}^2 \cdot s^{1/2}$) descrito pela curva “tijolo maciço”. A mesma constatação pode ser feita para os valores de sorptividade com a estabilização a dar-se para $0,00038 \text{ m/s}^{1/2}$ e o calcário amarelo isoladamente com $0,00039 \text{ m/s}^{1/2}$.

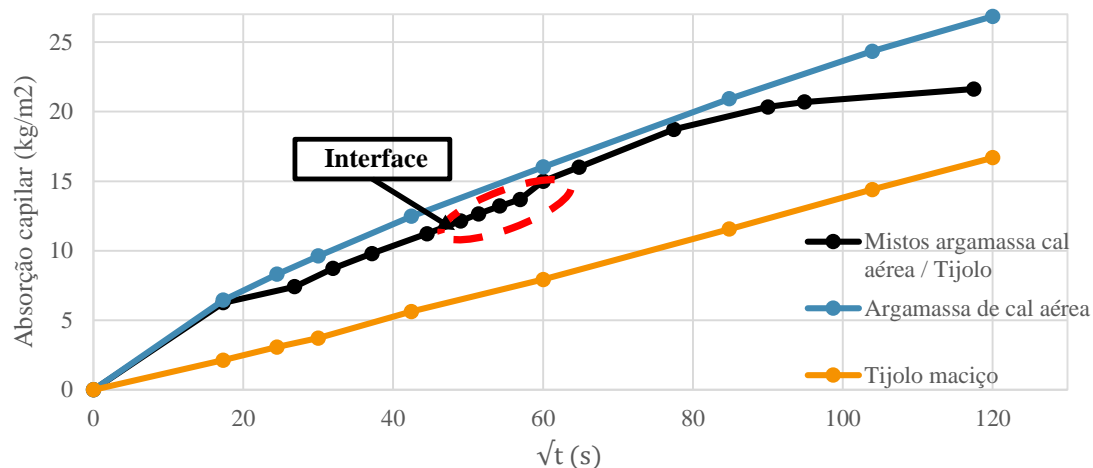


Figura 6.26: Curva de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior em argamassa de cal aérea e superior de tijolo e dos materiais em separado (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo)

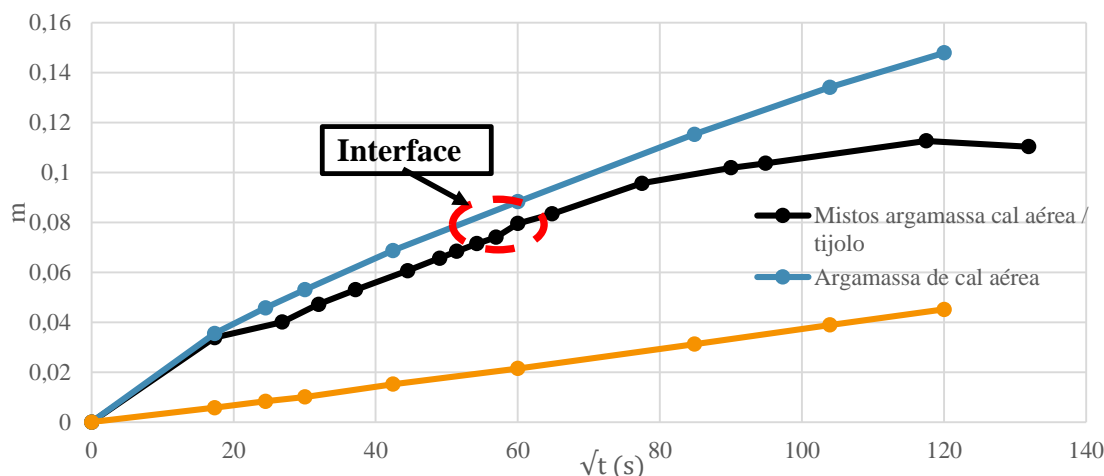


Figura 6.27: Curva de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior em argamassa de cal aérea e superior de tijolo e dos materiais em separado (avanço da coluna de água em função do tempo)

Granito

Dada a estrutura muito alterada do granito, a realização do ensaio de capilaridade sobre provetes mistos de argamassa de cal aérea e granito revelou-se inviável, pois, assim que a água atingia o interface, ascendia de imediato pelas fissuras no material, impossibilitando uma medição correcta.

6.4.1.2 Ensaios mistos com o meio inferior em pedra ou tijolo

Calcário Amarelo

O coeficiente de absorção capilar inicial foi de $0,016 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ valor igual ao obtido para o calcário amarelo quando o meio inferior era argamassa de cal aérea. Este valor manteve-se constante

até aproximadamente ao instante $50 \text{ s}^{1/2}$, seguindo-se um comportamento irregular levando a crer que a água se encontraria na interface. Em seguida, a curva estabilizou para um coeficiente de absorção capilar semelhante ao comportamento do calcário amarelo quando analisado isoladamente, descrito pela curva “calcário amarelo”. Em todo o ensaio nunca foi atingido um coeficiente semelhante ao da argamassa como se pode observar na figura 6.28 b). Na figura 6.29 são apresentadas as curvas do avanço da coluna de água em função do tempo de onde se podem retirar as mesmas conclusões. Tendo a sorptividade um valor constante excepto na zona de interface de $0,00016 \text{ m/s}^{1/2}$ apresentando o calcário individualmente um valor de $0,00018 \text{ m/s}^{1/2}$.

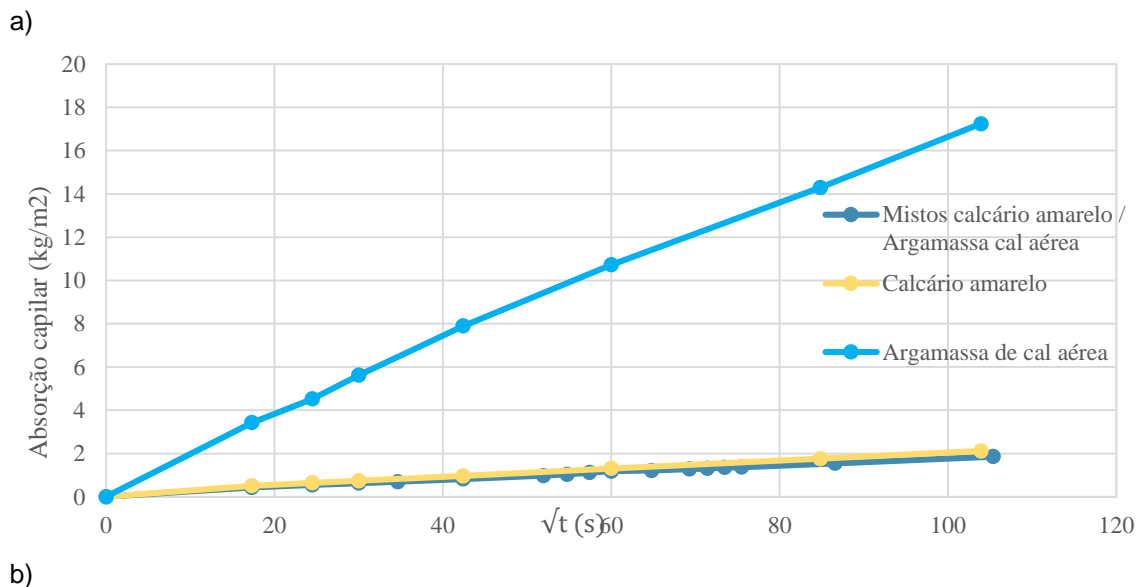
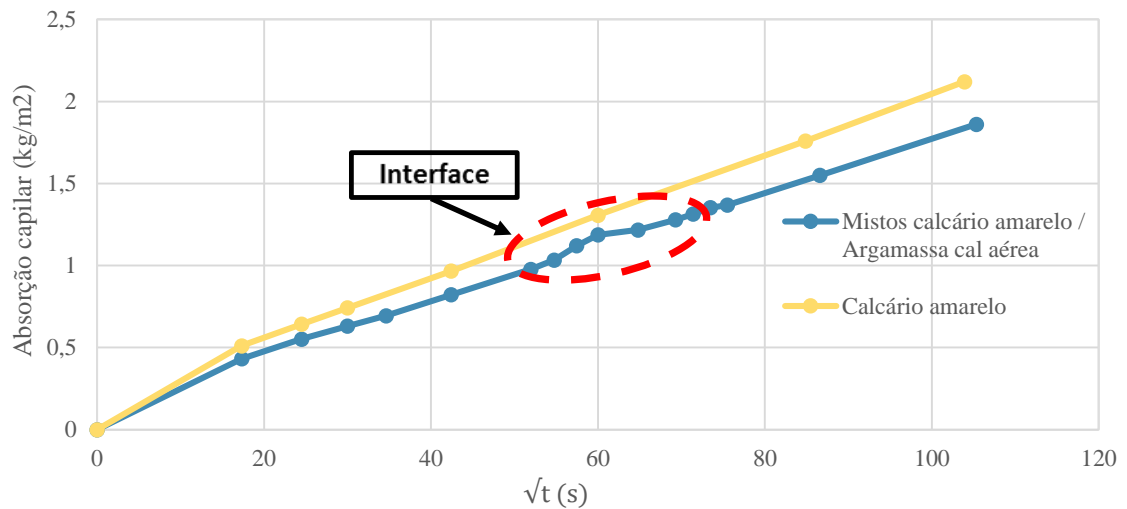
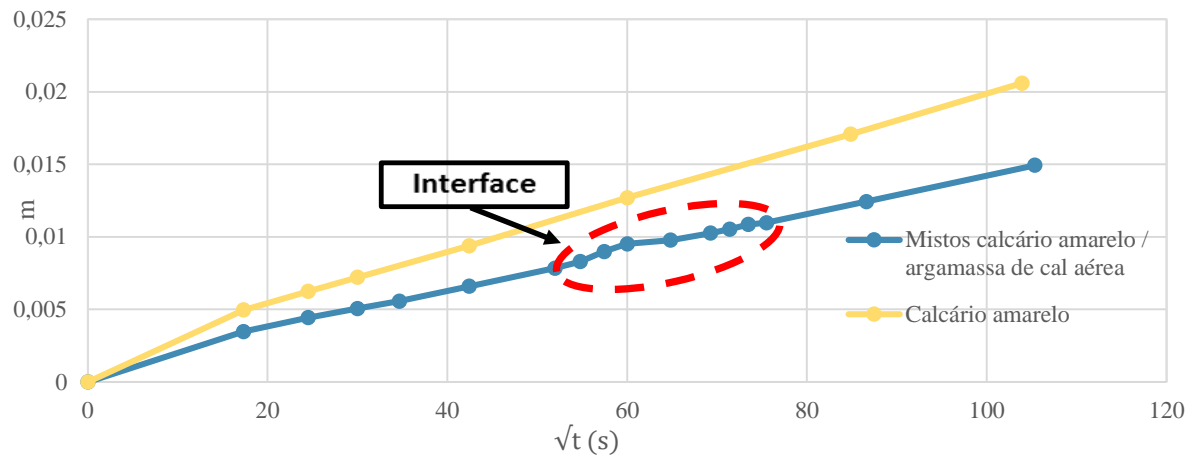
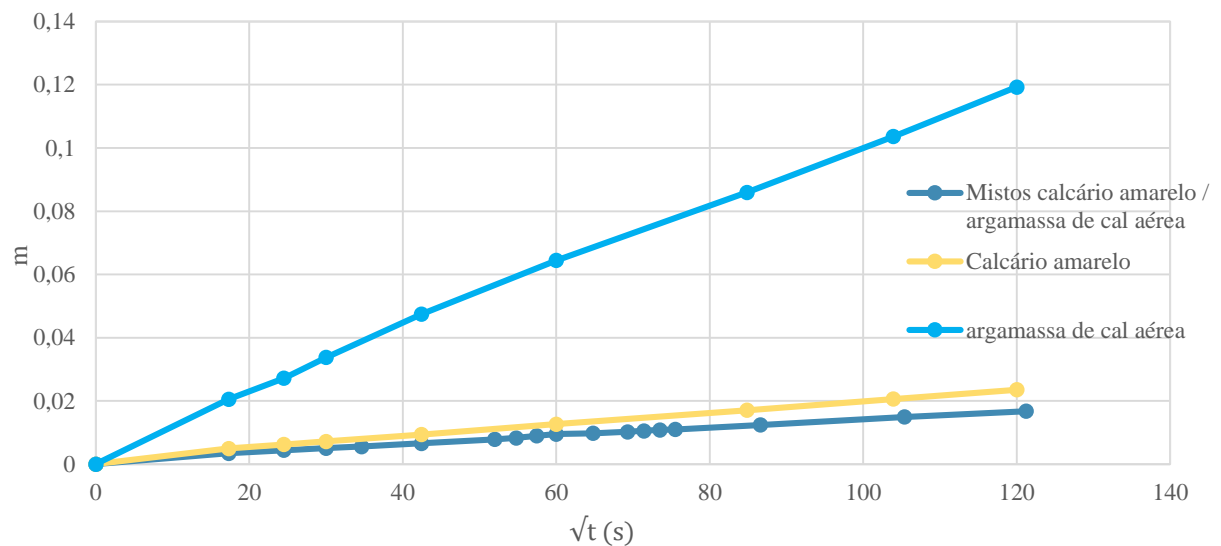


Figura 6.28: a) Curva de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de calcário amarelo e superior de argamassa de cal aérea e do calcário amarelo b) Curva de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de calcário amarelo e superior de argamassa de cal aérea e do calcário amarelo com a curva da argamassa de cal aérea (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo)



a)



b)

Figura 6.29: a) Curva de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de calcário amarelo e superior de argamassa de cal aérea e do calcário amarelo b) Curva de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de calcário amarelo e superior de argamassa de cal aérea e do calcário amarelo com a curva da argamassa de cal aérea (avanço da coluna de água em função do tempo)

Tijolo

O ensaio realizado nos provetes mistos de tijolo e argamassa de cal aérea revelou um coeficiente de absorção capilar inicial de $0,179 \text{ kg/m}^2.\text{s}^{1/2}$ coerente com o valor do tijolo maciço, como se pode ver pela figura 6.30 até aproximadamente ao instante $20 \text{ s}^{1/2}$. Seguiu-se um aumento do coeficiente de absorção capilar levando a crer que a água se encontrava na zona do interface. Em seguida, a curva estabilizou para um coeficiente de absorção capilar inferior, quer ao do tijolo quer ao da argamassa de cal aérea de $0,054 \text{ kg/m}^2.\text{s}^{1/2}$. A curva do avanço da coluna de água registou um

comportamento semelhante e a partir do interface como se pode observar na figura 6.31 e a estabilização deu-se para um valor de $0,00014\text{m/s}^{1/2}$.

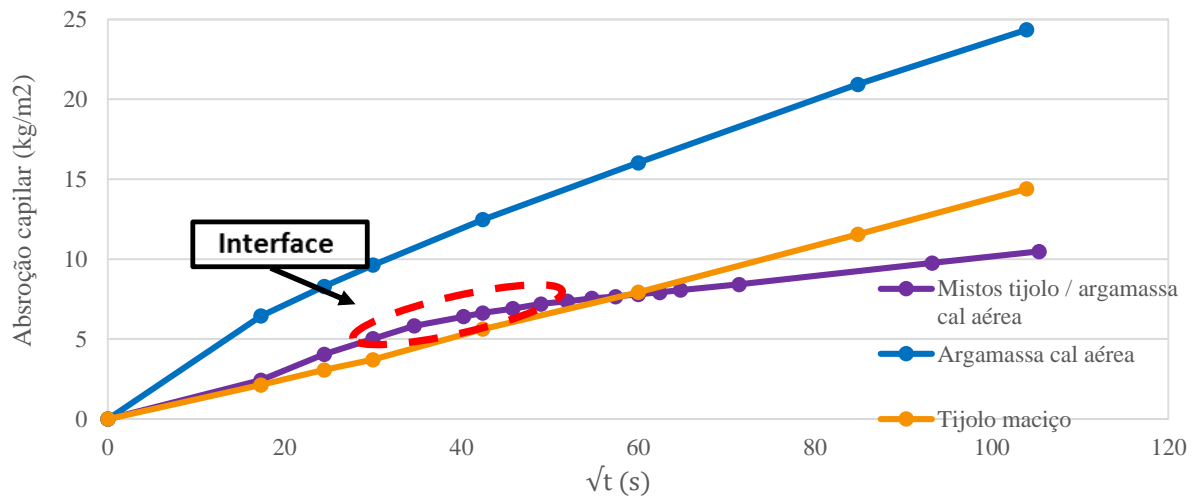


Figura 6.30: Curva de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior em tijolo e superior de argamassa de cal aérea e dos materiais em separado (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo)

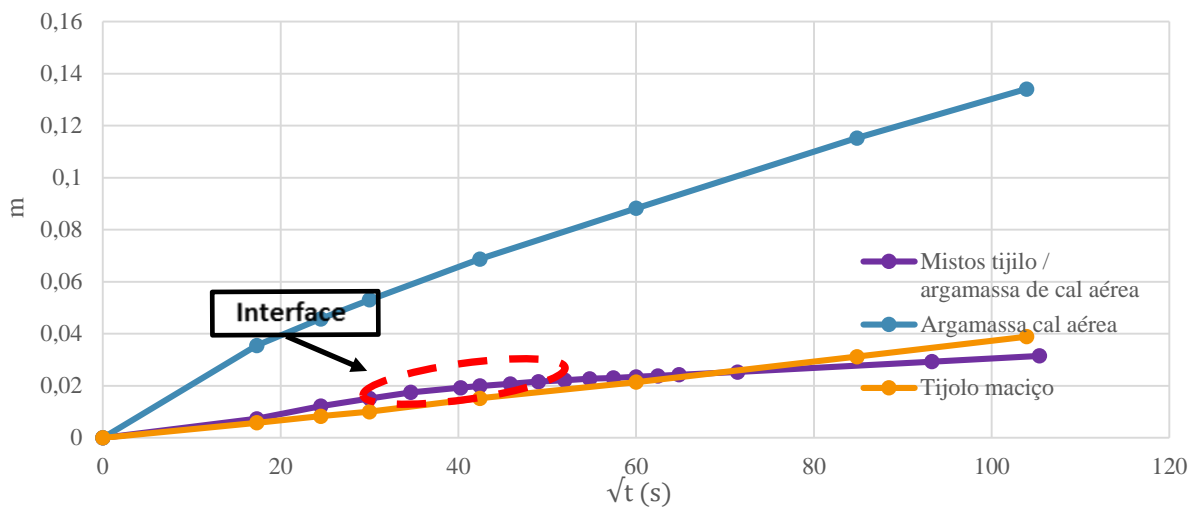
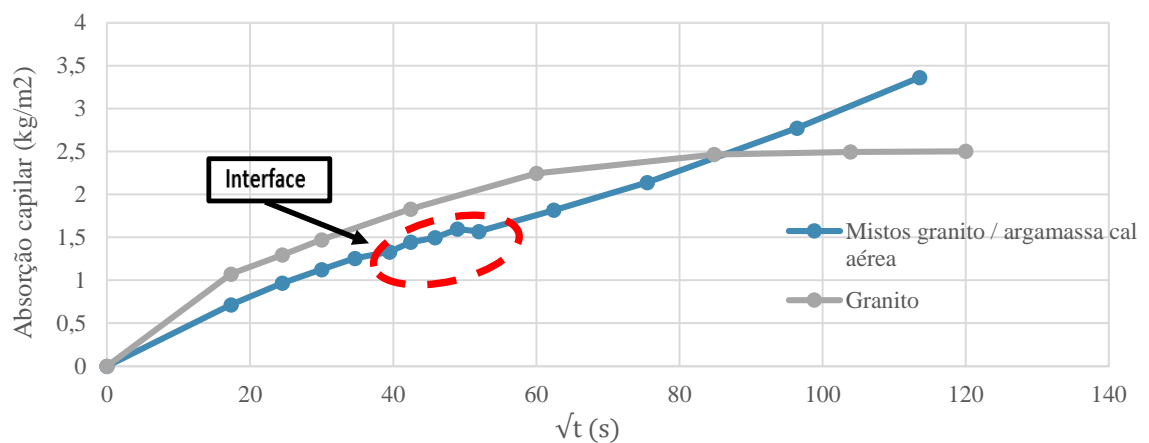


Figura 6.31: Curva de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior em tijolo e superior de argamassa de cal aérea e dos materiais em separado (avanço da coluna de água em função do tempo)

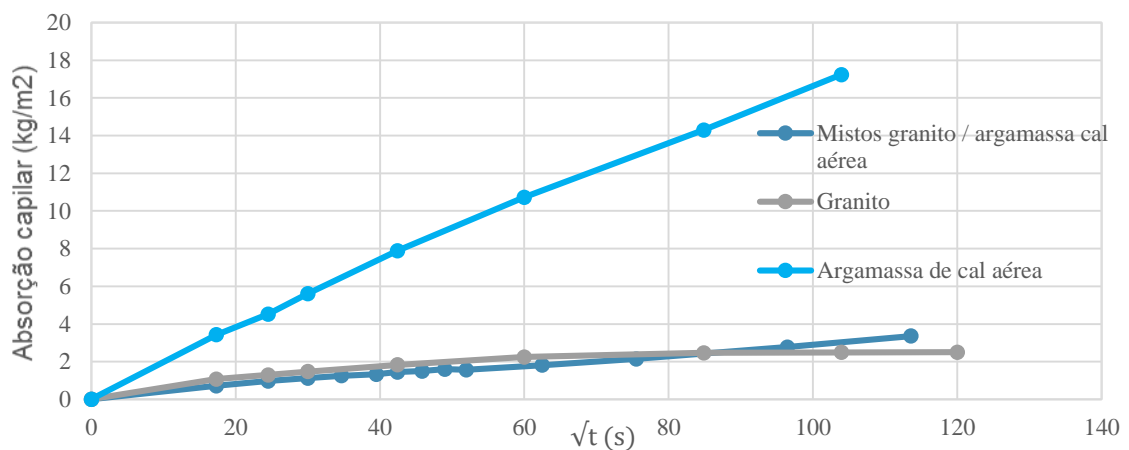
Granito

Contrariamente ao ensaio em que o meio inferior era a argamassa, foi possível ensaiar os provetes mistos sendo o meio inferior o granito de onde se extraiu uma curva de absorção capilar como ilustra a figura 6.32. A partir do instante $20\text{ s}^{1/2}$ registou-se um coeficiente de absorção capilar de $0,033\text{ kg/m}^2\cdot\text{s}^{1/2}$ coerente com os resultados obtidos para o granito representado na curva cinzenta. Este valor manteve-se constante até aproximadamente ao instante $40\text{ s}^{1/2}$ altura em que se verificou um aumento

do valor do coeficiente de absorção capilar apontando para a zona de interface. Em seguida a ascensão estabilizou para o valor $0,041 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ que se revelou superior ao do granito que registou um valor de $0,035 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ mas inferior à argamassa que registou um coeficiente de absorção capilar de $0,209 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$. Em todo o ensaio nunca foi atingido um coeficiente semelhante ao da argamassa como se pode ver na figura 6.32 b). Na figura 6.33 são apresentadas as curvas do avanço da coluna de água em função do tempo de onde se podem retirar as mesmas conclusões. Tendo a sorptividade um valor constante a partir do interface de $0,00078 \text{ m/s}^{1/2}$ apresentando o granito individualmente um valor de $0,00058 \text{ m/s}^{1/2}$ e a argamassa de cal aérea de $0,0012 \text{ m/s}^{1/2}$.

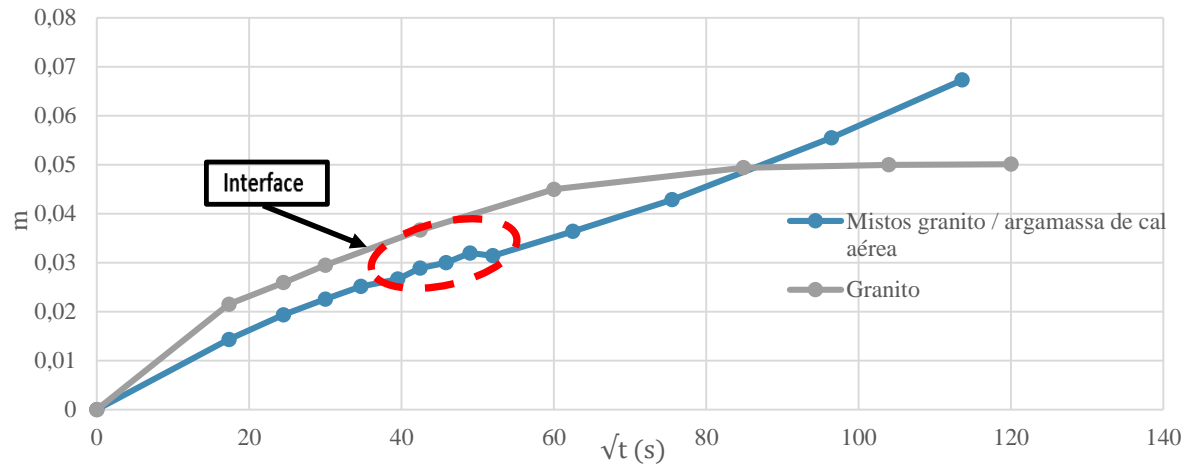


a)

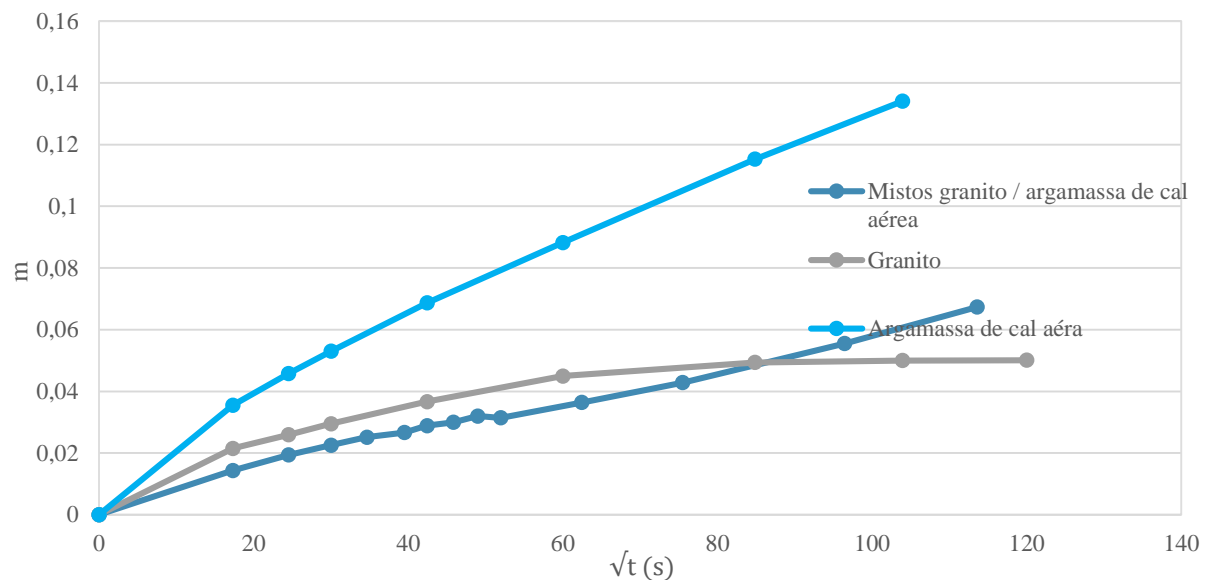


b)

Figura 6.32: a) Curva de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de granito e superior de argamassa de cal aérea e do granito b) Curva de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de granito e superior de argamassa de cal aérea e do granito com a curva da argamassa de cal aérea (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo)



a)



b)

Figura 6.33: a) Curva de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de granito e superior de argamassa de cal aérea e do granito b) Curva de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de granito e superior de argamassa de cal aérea e do granito com a curva da argamassa de cal aérea (avanço da coluna de água em função do tempo)

6.4.2 Ensaios de capilaridade sobre provetes mistos com argamassa de cal hidráulica

Até aproximadamente ao instante $65 \text{ s}^{1/2}$, o ensaio de capilaridade registou um coeficiente de absorção capilar para todas as amostras de aproximadamente $0,155 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$, coerente com o obtido nos ensaios de capilaridade onde apenas se analisam os provetes de argamassa de cal hidráulica simples, obtendo-se um valor de $0,158 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ tal como a sorptividade com um valor de $0,0009 \text{ m/s}^{1/2}$. Em todas as amostras a partir deste tempo, obtiveram-se comportamentos não lineares do valor do

coeficiente de absorção capilar, levando a crer, que esta zona de irregularidade seria o local onde a água encontra o interface entre os materiais. A partir deste ponto, o coeficiente de absorção capilar estabilizava entre diferentes valores consoante o material que se encontra em cima tal como o valor da sorptividade. Para uma fácil compreensão dos dados, são apresentados em seguida os gráficos onde constam as curvas de ascensão capilar dos provetes mistos, conjuntamente com as curvas de ascensão para os materiais analisados isoladamente.

6.4.2.1 Ensaios mistos com o meio inferior em argamassa de cal hidráulica

Calcário amarelo

O comportamento do provete misto de argamassa de cal hidráulica e calcário amarelo apresentado na figura 6.34 permite observar um comportamento capilar até aproximadamente ao instante $65 \text{ s}^{1/2}$ igual ao que se obtém para a argamassa de cal hidráulica isoladamente representada na curva “cal hidráulica”. Seguiu-se uma fase com um comportamento irregular apontando para a zona do interface, estabilizando a curva de absorção capilar para $0,016 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ próximo do obtido para o calcário amarelo, descrito no gráfico abaixo pela curva “Calcário amarelo”. A mesma constatação pode ser feita para os valores de sorptividade com a estabilização a dar-se para $0,00019 \text{ m/s}^{1/2}$ e o calcário amarelo isoladamente com $0,00018 \text{ m/s}^{1/2}$ na figura 6.35.

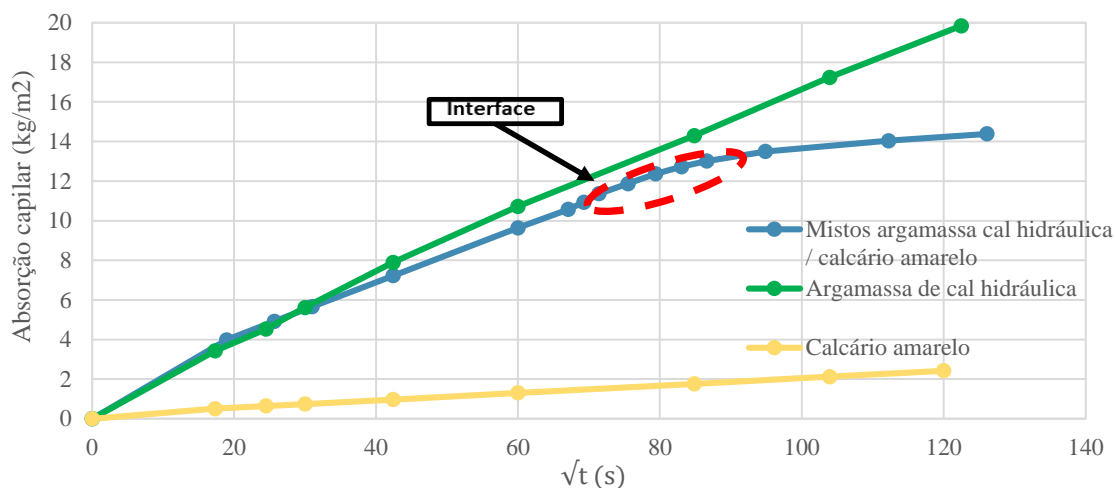


Figura 6.34: Curvas de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de argamassa de cal hidráulica e superior de calcário amarelo e dos materiais em separado (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo)

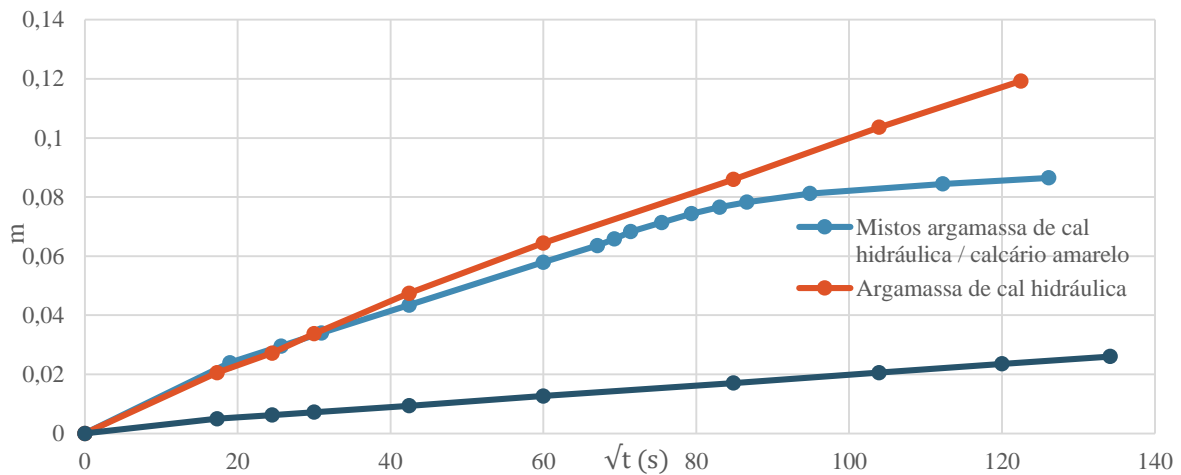


Figura 6.35: Curvas de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de argamassa de cal hidráulica e superior de calcário amarelo e dos materiais em separado (avanço da coluna de água em função do tempo)

Tijolo

O A figura 6.36 ilustra o comportamento dos provetes mistos de cal hidráulica e tijolo, observando-se um coeficiente de absorção capilar aproximadamente até ao instante $65 \text{ s}^{1/2}$ igual ao que se obteve para a argamassa de cal hidráulica isoladamente. Segue-se uma fase com um comportamento irregular indicando ser a zona de interface e em seguida, a curva de absorção capilar estabiliza no valor de $0,157 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ valor próximo do obtido para o tijolo analisado isoladamente descrito no gráfico abaixo pela curva “Tijolo maciço”. Já no que toca aos valores de sorptividade estes mantiveram-se constantes ao longo de todo o ensaio e idênticos aos da argamassa de cal hidráulica com um valor de $0,0010 \text{ m/s}^{1/2}$ como apresentado na figura 6.37.

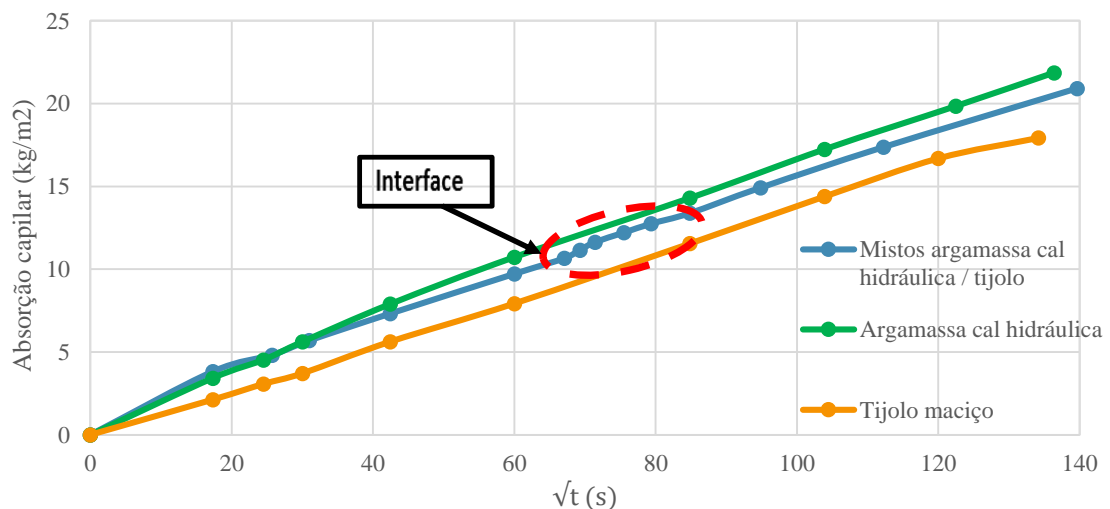


Figura 6.36: Curvas de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de argamassa de cal hidráulica e superior de tijolo e dos materiais em separado (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo)

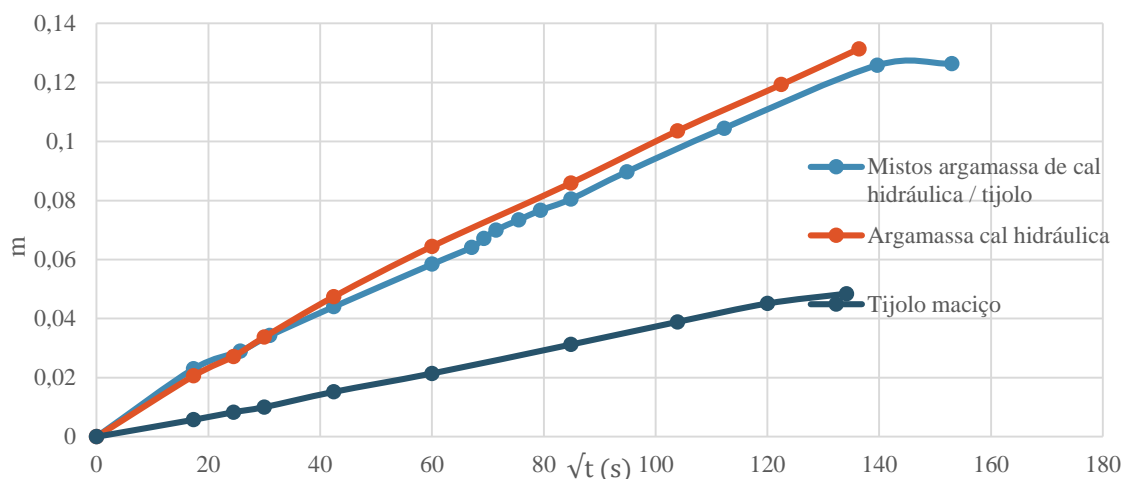


Figura 6.37: Curvas de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de argamassa de cal hidráulica e superior de tijolo e dos materiais em separado (avanço da coluna de água em função do tempo)

Granito

Tal como nos ensaios de capilaridade mistos com cal aérea e granito, também neste caso não foi possível realizar um ensaio com precisão, optando-se por excluir o granito neste ensaio.

6.4.2.2 Ensaios mistos com o meio inferior em pedra ou tijolo

Calcário amarelo

O coeficiente de absorção capilar inicial para a amostra de calcário amarelo e argamassa de cal hidráulica foi de $0,013 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ valor da mesma ordem de grandeza ao obtido no calcário amarelo que registou um coeficiente de absorção capilar de $0,017 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$. Neste ensaio não se observou uma variação significativa que apontasse para a zona do interface, estabilizando a curva para um coeficiente de absorção capilar constante durante todo o ensaio como se observa na figura 6.38. Contudo, dada a espessura do calcário amarelo ser a mesma dos ensaios com argamassa de cal aérea onde foi possível visualizar a diferença, poder-se-á inferir que o interface será aproximadamente no instante $50 \text{ s}^{1/2}$. Na figura 6.39 são apresentadas as curvas do avanço da coluna de água em função do tempo de onde se podem retirar as mesmas conclusões. Tendo a sorptividade um valor constante excepto na zona de interface de $0,00016 \text{ m/s}^{1/2}$ apresentando o calcário individualmente um valor de $0,00018 \text{ m/s}^{1/2}$.

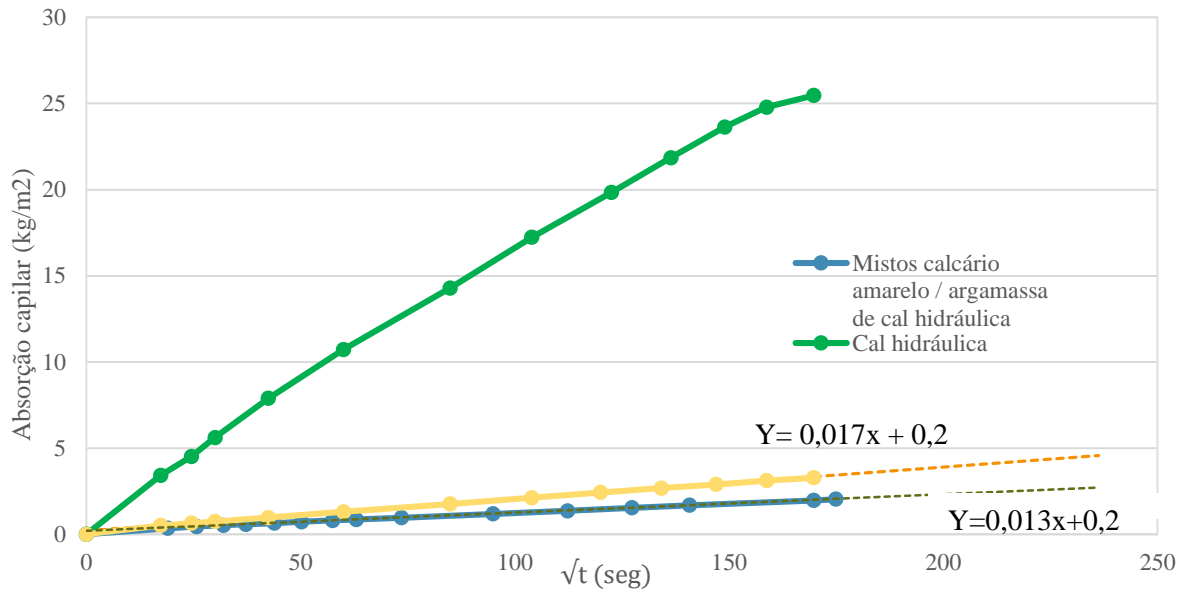


Figura 6.38: Curvas de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de calcário amarelo e superior de argamassa de cal hidráulica e do calcário amarelo (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo)

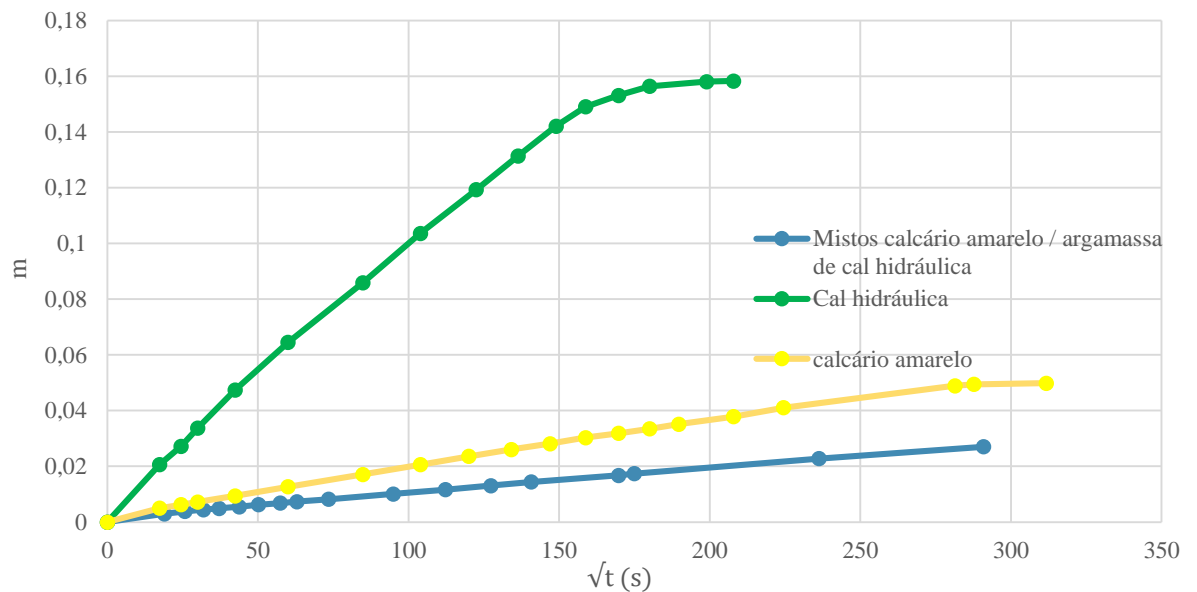


Figura 6.39: Curvas de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de calcário amarelo e superior de argamassa de cal hidráulica e do calcário amarelo (avanço da coluna de água em

Tijolo

A análise às amostras de tijolo e cal hidráulica presentes na Figura 6.40 revelaram um coeficiente de absorção capilar inicial de $0,141 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$. Este valor é constante até aproximadamente ao instante $40 \text{ s}^{1/2}$. Seguiu-se uma redução do coeficiente de absorção capilar levando a crer que a água se encontrava na zona do interface. Em seguida a curva estabilizou para um coeficiente de absorção capilar de $0,052 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ inferior, quer ao do tijolo, quer ao da argamassa de cal hidráulica.

A curva do avanço da coluna de água registou um comportamento semelhante e a partir do interface como se pode observar na figura 6.41a estabilização deu-se para um valor de $0,00025\text{m/s}^{1/2}$.

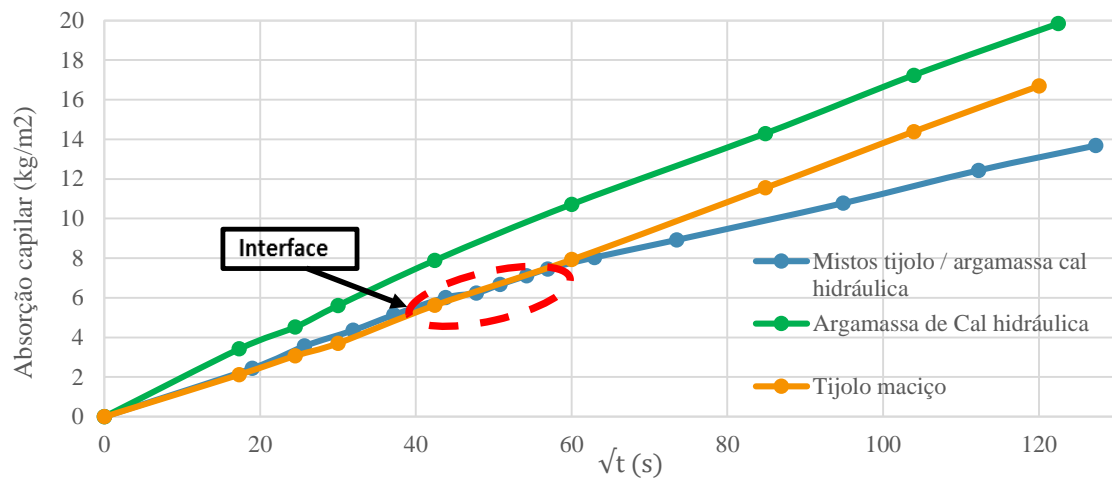


Figura 6.40: Curvas de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de tijolo e superior de argamassa de cal hidráulica e dos materiais em separado (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo)

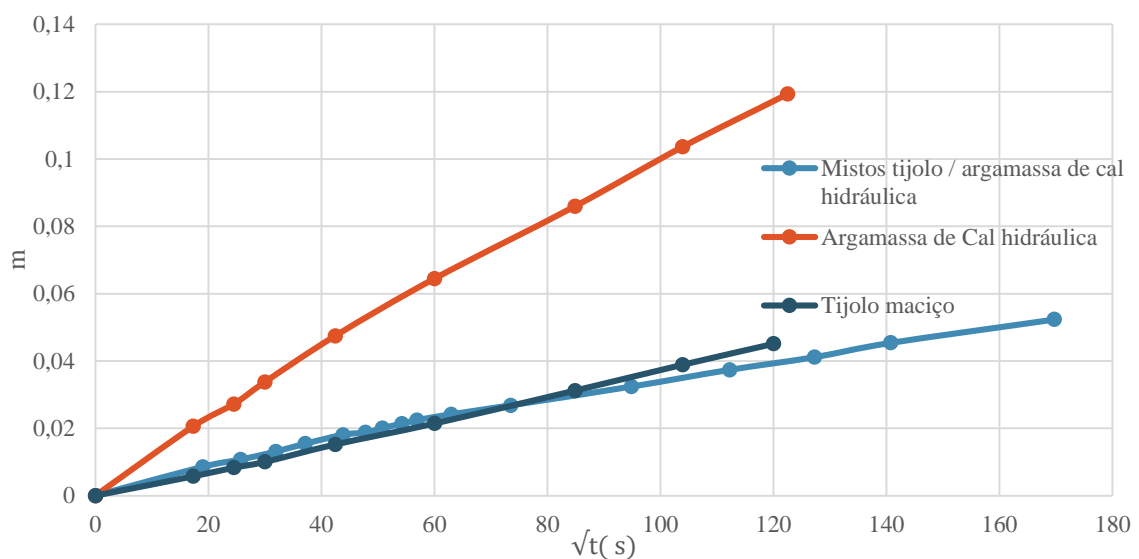


Figura 6.41: Curvas de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de tijolo e superior de argamassa de cal hidráulica e dos materiais em separado (evolução da coluna de água em função do tempo)

Granito

Tal como nos provetes mistos com argamassa de cal aérea, tendo o granito como meio inferior, também com a cal hidráulica foi possível realizar o ensaio neste sentido, como ilustra a Figura 6.42. O coeficiente de absorção capilar inicial para a amostra em causa foi de $0,035\text{kg/m}^2.\text{s}^{1/2}$. Este valor foi constante até aproximadamente ao instante $20\text{ s}^{1/2}$ altura em que se verifica um aumento do valor do coeficiente de absorção capilar, o que aponta para a zona do interface. Em seguida a ascensão

estabiliza para um valor de $0,051 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ superior ao do granito mas inferior ao da argamassa. Na figura 6.43 são apresentadas as curvas do avanço da coluna de água em função do tempo de onde se podem retirar as mesmas conclusões. Tendo a sorptividade um valor constante a partir do interface de $0,0071 \text{ m/s}^{1/2}$ apresentando o granito individualmente um valor de $0,0058 \text{ m/s}^{1/2}$ e a argamassa de cal hidráulica de $0,0011 \text{ m/s}^{1/2}$.

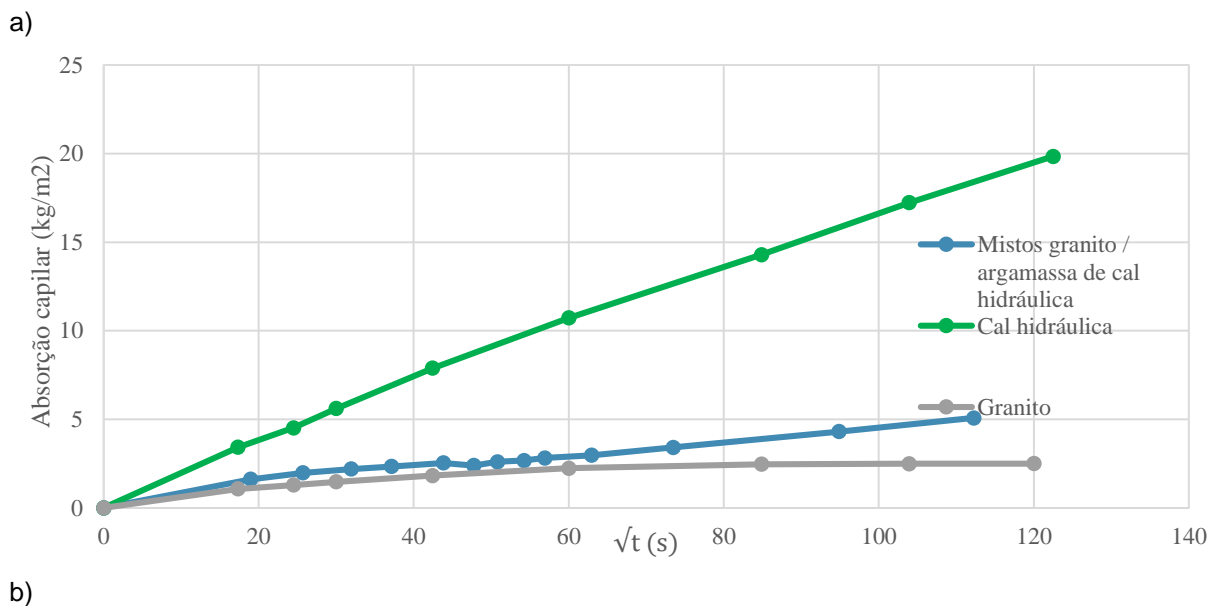
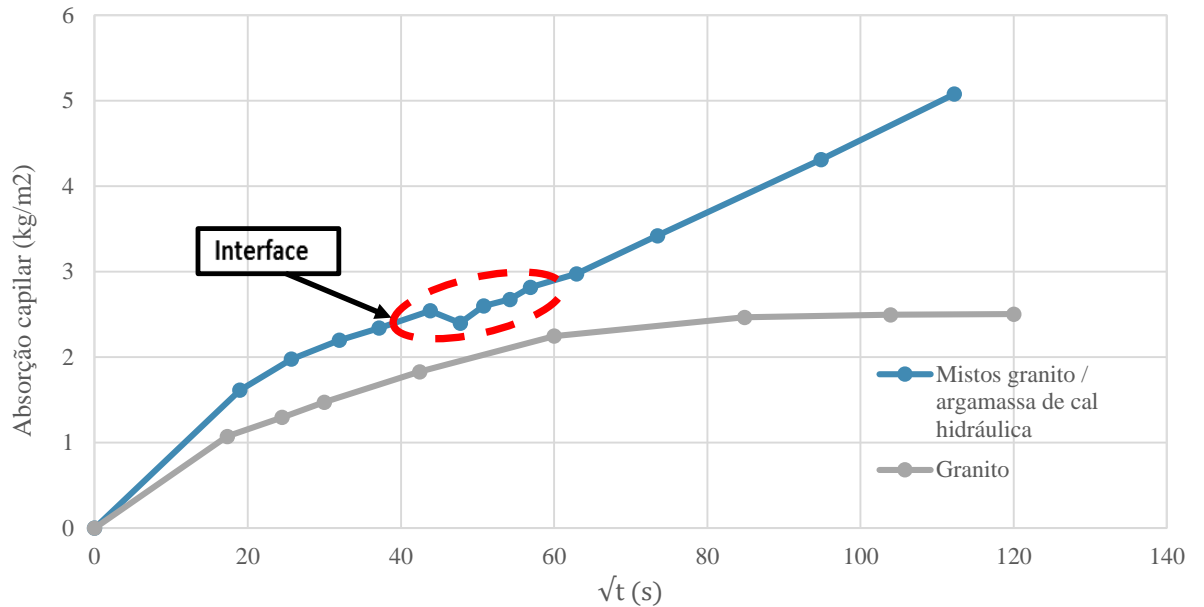


Figura 6.42: a) Curvas de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de granito e superior de argamassa de cal hidráulica e do granito b) Curvas de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de granito e superior de argamassa de cal hidráulica e do granito com a curva da argamassa de cal hidráulica (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo)

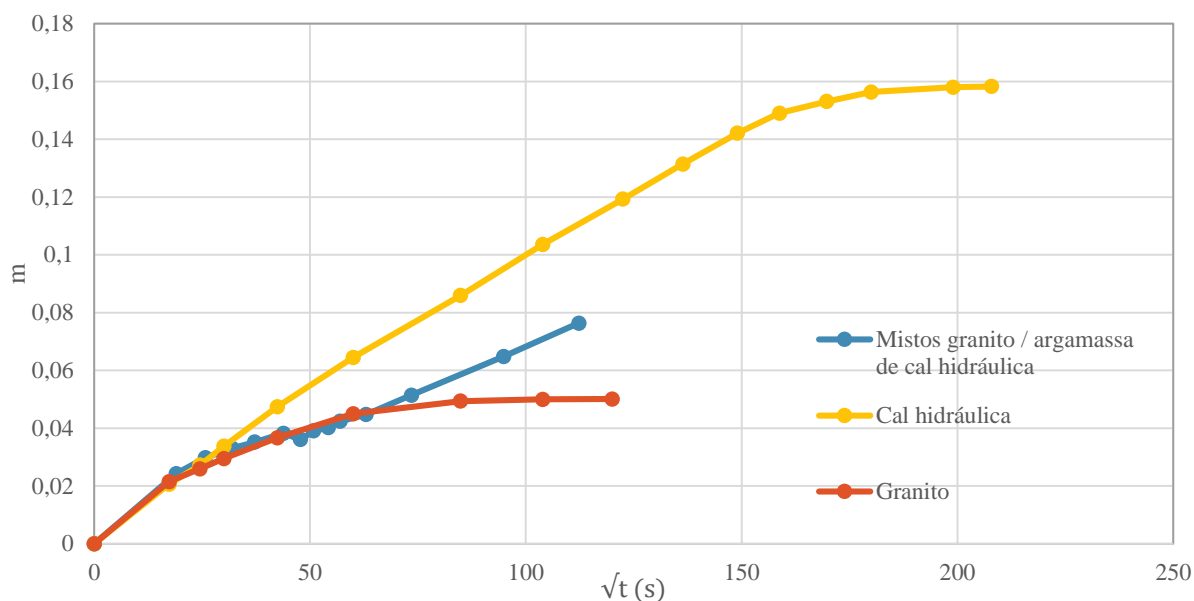


Figura 6.43: Curvas de absorção capilar em provetes mistos com o meio inferior de granito e superior de argamassa de cal hidráulica e do granito com a curva da argamassa de cal hidráulica (evolução da coluna de água em função do tempo)

6.4.3 Discussão dos ensaios de capilaridade sobre provetes mistos

A análise dos ensaios de capilaridade sobre provetes mistos permitiu constatar que quando a superfície de contacto com a água é a argamassa dá-se uma ascensão semelhante à obtida para a argamassa isoladamente até à zona do interface. Quando a água encontra esta zona, observa-se um comportamento irregular e em seguida a absorção capilar estabiliza em valores, aproximadamente iguais aos que se obtêm para as amostras em separado.

Quando a análise é realizada com a pedra ou o tijolo em contacto com a água, o comportamento inicial é o mesmo para as amostras isoladas e ao chegar ao interface regista-se uma zona de irregularidade momentânea. A partir desse momento, as tendências dos coeficientes de absorção capilar e da sorptividade passam a ser as seguintes:

-Calcário amarelo / Argamassa de cal aérea: o coeficiente de absorção capilar e sorptividade mantiveram-se;

-Tijolo / Argamassa de cal aérea: redução quer do coeficiente de absorção capilar quer da sorptividade para um valor inferior quer ao tijolo, quer à argamassa de cal aérea;

-Granito / Argamassa de cal aérea: acréscimo quer do coeficiente de absorção capilar quer da sorptividade para um valor superior ao do granito, mas inferior ao da argamassa de cal aérea;

-Calcário amarelo / Argamassa de cal hidráulica: o coeficiente de absorção capilar e a sorptividade mantiveram-se;

-Tijolo / Argamassa de cal hidráulica: redução quer do coeficiente de absorção capilar quer da sorptividade para um valor inferior quer ao do tijolo, quer à argamassa de cal hidráulica;

-Granito / Argamassa de cal hidráulica: acréscimo do coeficiente de absorção capilar e da sorptividade para um valor superior ao do granito, mas inferior ao da argamassa de cal hidráulica.

Para a compreensão deste fenómeno, é necessário assimilar as forças que estão envolvidas na ascensão capilar. Da equação 3.1 resulta que quanto menor for o diâmetro capilar, maior será o diferencial de pressão e, como tal, quanto menor o diâmetro do poro, maior a resultante que se gera no capilar com sentido ascendente.

Começando por analisar os provetes mistos com o meio que faz o contacto com a água em tijolo e partindo da ideia anterior, é necessário numa primeira fase compreender as curvas de intrusão incremental de mercúrio no tijolo e nas argamassas de cal aérea e cal hidráulica apresentadas na figura 6.44.

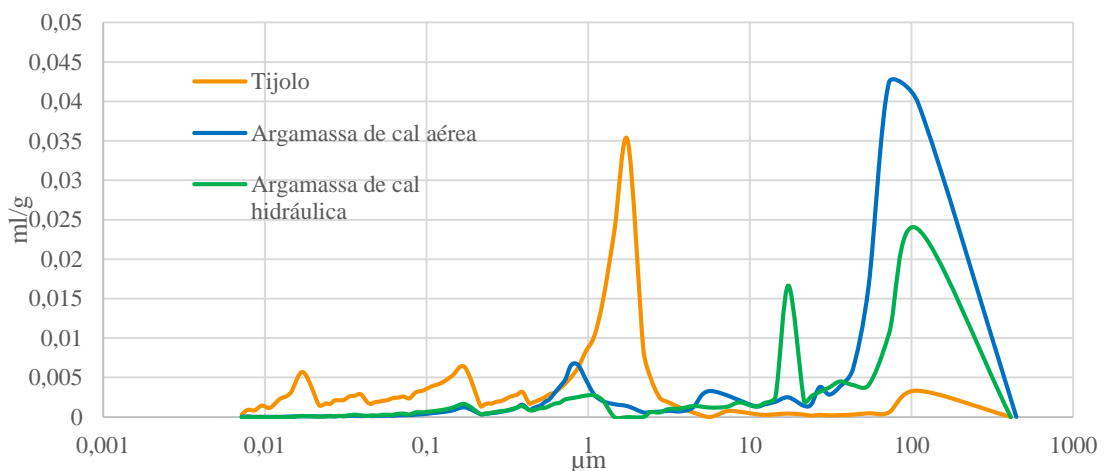


Figura 6.44: Curvas de intrusão incremental de mercúrio do tijolo e das argamassas de cal aérea e cal hidráulica

Uma das primeiras conclusões que se podem retirar é que o tijolo apresenta um volume de poros com diâmetros menores que $3\mu\text{m}$, superior às argamassas. Como tal, quando se dá a ascensão da água pelo tijolo, ao chegar à argamassa, como os poros desta têm um diâmetro consideravelmente superior ao tijolo, não conseguem gerar pressão suficiente para absorver a água através do tijolo, dando-se uma redução do coeficiente de absorção capilar e da sorptividade já que esta depende da evolução da água no material e se não se gera pressão suficiente o avanço diminui.

Tal conclusão é coerente com Young [41], afirmando que, quando a água passa de um capilar de menor diâmetro para outro maior, a absorção capilar diminui consideravelmente.

Embora mais evidente no tijolo, este fenómeno também ocorre quando o meio em contacto com água foi o granito, mas de forma inversa, já que, quando a água atinge a argamassa, quer esta seja de cal hidráulica ou aérea, dá-se um acréscimo do coeficiente de absorção capilar para um valor superior ao granito mas inferior às argamassas. Veja-se a Figura 6.45 que ilustra a porometria das amostras de granito e das argamassas de cal hidráulica e aérea.

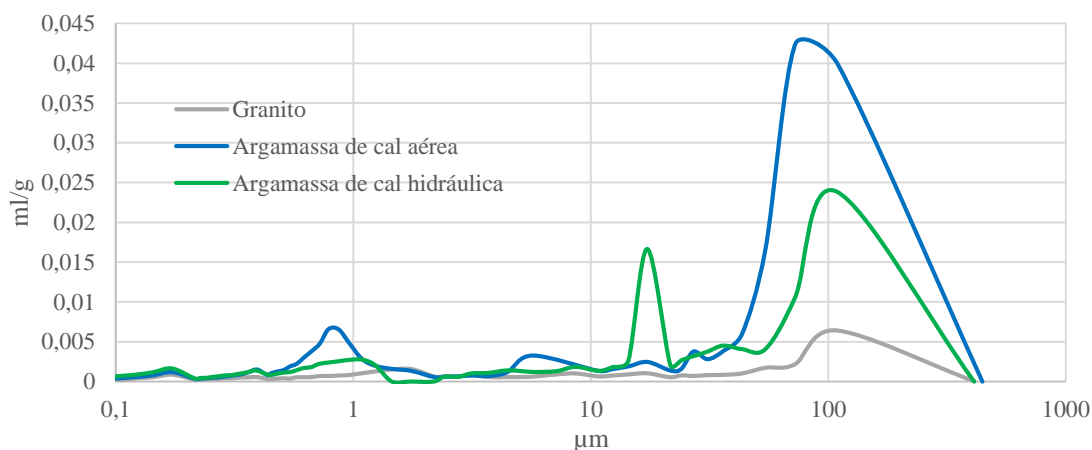


Figura 6.45: Curvas de intrusão incremental de mercúrio do granito e das argamassas de cal aérea e cal hidráulica

Ao contrário do tijolo, as argamassas apresentam um maior volume de poros com reduzido diâmetro, em comparação com o granito. Neste caso, quando a água atinge a argamassa dá-se uma redução do diâmetro capilar. Como consequência a pressão capilar aumenta, originando um aumento da absorção capilar e como tal tanto a sorptividade como o coeficiente de absorção capilar aumentaram para um valor superior ao granito, mas inferior à argamassa.

No caso em que o meio em contacto com água é o calcário amarelo o coeficiente de absorção capilar manteve-se constante. Analisando a Figura 6.46 onde constam as curvas do calcário a amarelo e das argamassas, constata-se que o calcário amarelo apresenta um maior volume de poros de pequenas dimensões face às argamassas.

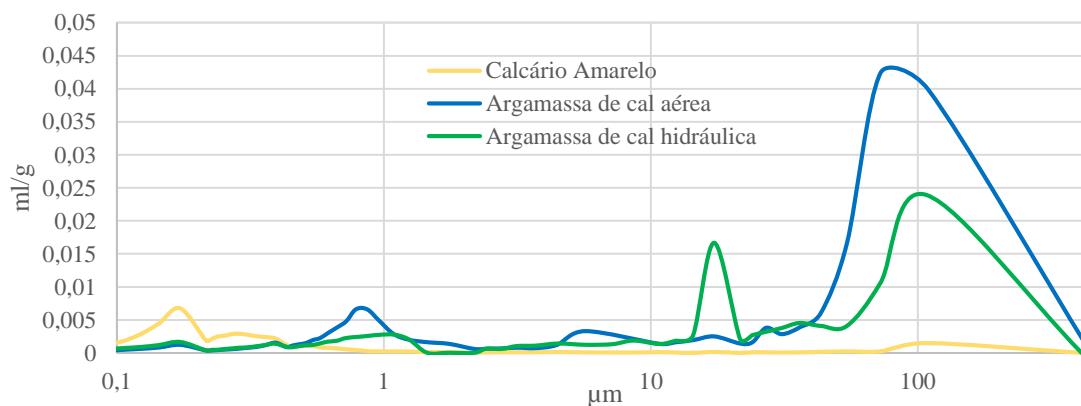


Figura 6.46: Curvas de intrusão incremental de mercúrio do tijolo e das argamassas de cal aérea e cal hidráulica

Seria expectável que da mesma forma, se registasse uma redução do coeficiente de absorção capilar, no entanto tal não ocorreu. Em primeiro lugar o calcário amarelo fornece à argamassa uma quantidade de água reduzida face à que esta consegue absorver por capilaridade. Em segundo lugar, embora em menor quantidade, as argamassas também têm poros de pequenas dimensões que conseguem absorver água através dos poros do calcário amarelo. Deste modo, se o coeficiente de absorção capilar se manteve, significa que, os poros de pequenas dimensões que possui foram

suficientes para gerar uma pressão que permitiu manter um coeficiente igual ao do calcário amarelo. A relação é análoga no caso da sorptividade deste modo a evolução da água na argamassa depende directamente do calcário amarelo.

Quando o meio em contacto com água é a argamassa, o coeficiente de absorção capilar ao atingir o segundo material, é como já referido, igual a cada material quando analisado isoladamente. Fazendo uma análise análoga à anterior, como qualquer material analisado tem poros de menores dimensões face às argamassas, quando a água chega ao interface, o material que se encontra por cima da argamassa, consegue gerar pressão suficiente para absorver a água através da argamassa e atingir o coeficiente de capilaridade idêntico àquele que obtém quando colocado sobre uma linha de água. Relativamente às sorptividades as conclusões a retirar são semelhantes na medida em que esta depende directamente da forma como a água evolui no corpo, e se há um acréscimo ou redução do volume de água absorvida o valor da sorptividade consequentemente alterar-se-á.

6.5 Ensaios de capilaridade mistos com interface simples

O presente ensaio apenas foi realizado para o calcário amarelo, tijolo e argamassa de cal aérea. Durante o presente ensaio observou-se a formação de uma linha de água entre os materiais tal como ilustra a figura 6.47. O ensaio foi em primeiro lugar, realizado com o meio a saturar em argamassa de cal aérea e numa segunda fase o material que está saturado é o mesmo que o material seco



Figura 6.47: Linha de água no interface entre os provetes

6.5.1 Capilaridade com o meio saturado de argamassa

Calcário amarelo

No ensaio com calcário amarelo formou-se uma linha de água entre os materiais aproximadamente no instante $100 \text{ s}^{1/2}$. A partir deste instante, o coeficiente de absorção capilar estabilizou para $0,015 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ semelhante ao do calcário amarelo quer isoladamente, quer nos ensaios mistos com o meio em contacto com água em argamassa de cal aérea, como apresentado na Figura 6.48. Na figura 6.49 apresentam-se as curvas de sorptividade para as mesmas situações que permite acompanhar a evolução da frente líquida.

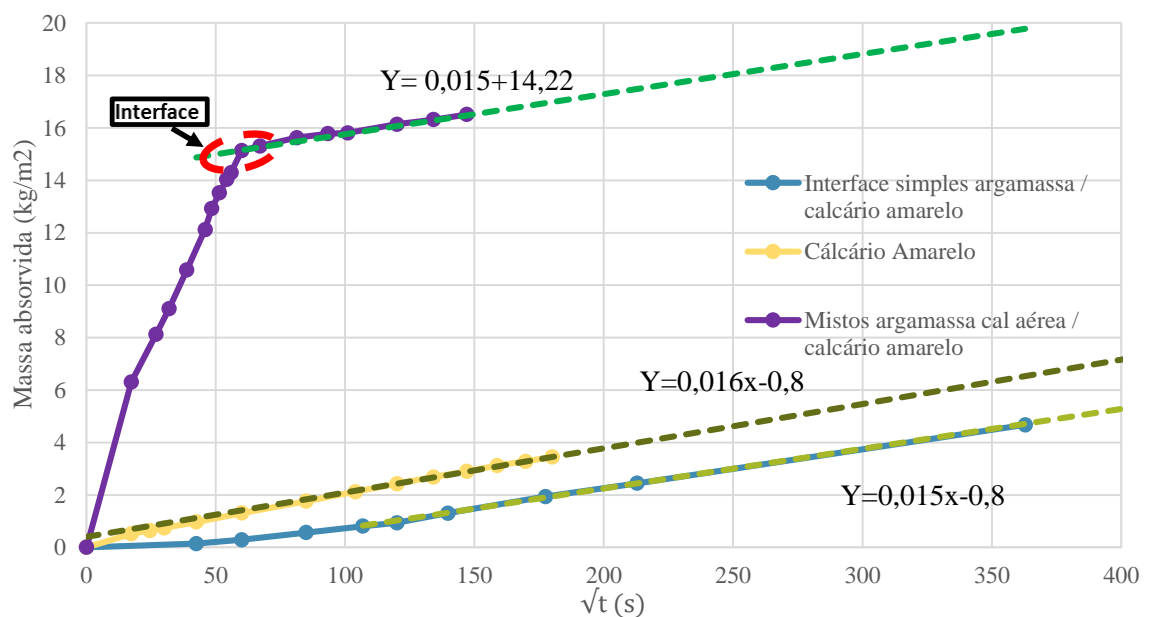


Figura 6.48: Curvas de absorção capilar de provetes mistos com interface simples com meio saturado de argamassa de cal aérea e seco de calcário amarelo e de provetes mistos com meio inferior em argamassa de cal aérea e calcário amarelo (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo)

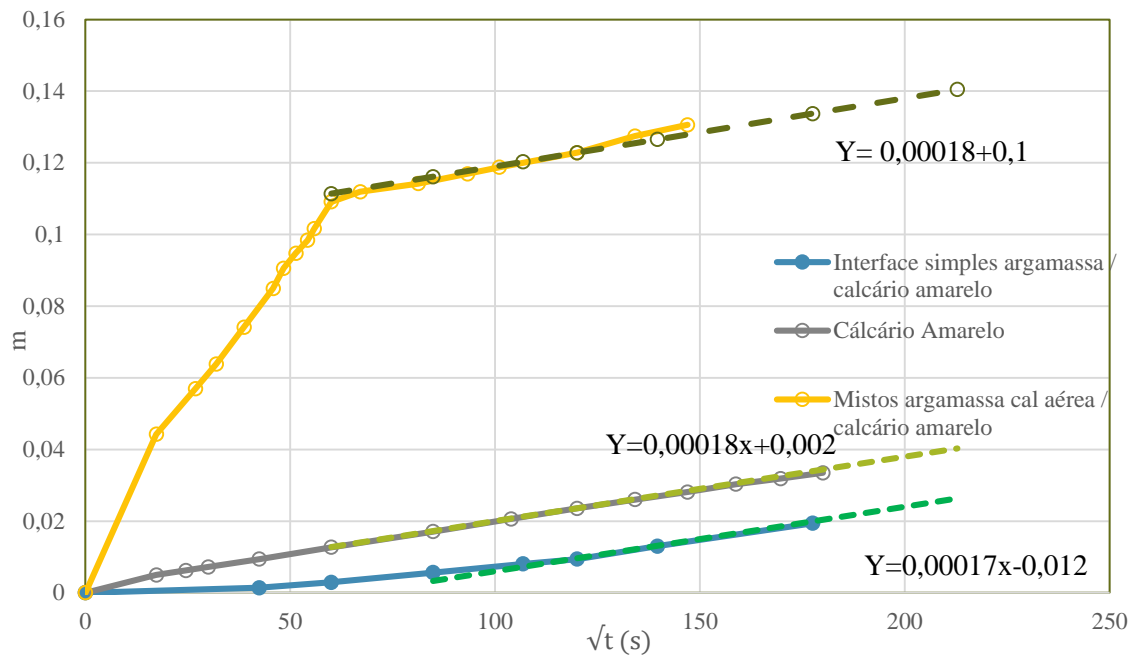


Figura 6.49: Curvas de absorção capilar de provetes mistos com interface simples com meio saturado de argamassa de cal aérea e seco de calcário amarelo e de provetes mistos com meio inferior em argamassa de cal aérea e calcário amarelo (evolução da coluna de água em função do tempo)

Tijolo

A formação da linha de água no tijolo deu-se no instante $100 \text{ s}^{1/2}$ como se pode observar na figura 6.50. A partir desse ponto, verificou-se um acréscimo gradual da absorção capilar até estabilizar no valor de $0,18 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ semelhante ao que se obteve para o tijolo nos ensaios mistos com o meio inferior em argamassa de cal aérea e o superior em tijolo. O mesmo resultado foi observado no tijolo apresentando o tijolo após a formação da linha de água uma sorptividade de $0,00038 \text{ m/s}^{1/2}$ valor semelhante ao do tijolo quando analisado isoladamente como se observa na figura 6.51.

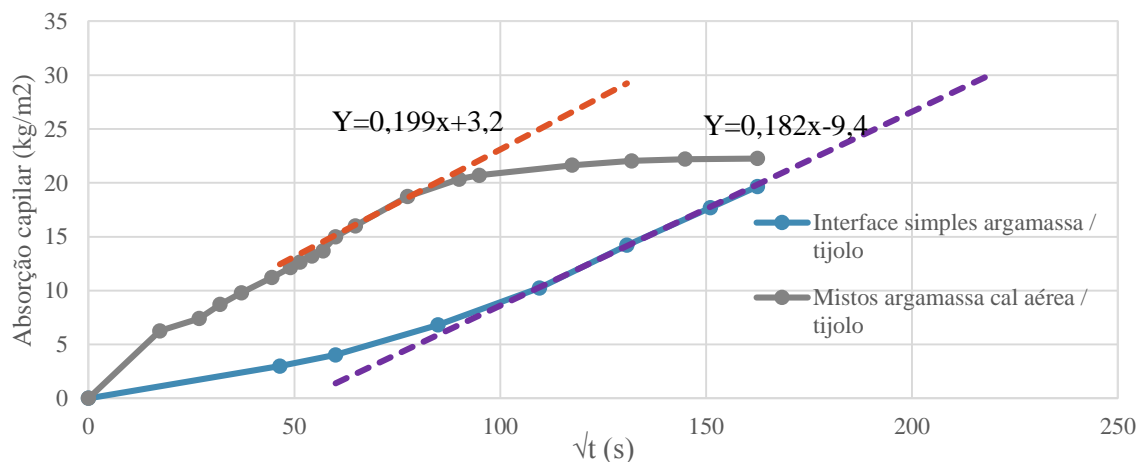


Figura 6.50: Curvas de absorção capilar em provetes mistos de interface simples com meio saturado de argamassa de cal aérea e seco de tijolo e de provetes mistos com meio inferior em argamassa de cal aérea e tijolo (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo)

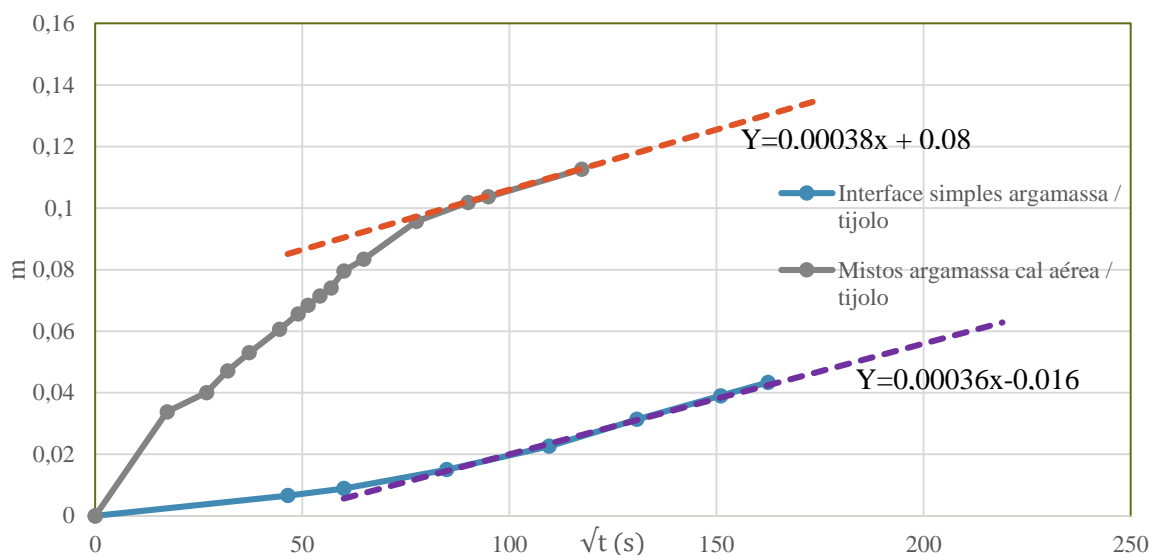


Figura 6.51: Curvas de absorção capilar em provetes mistos de interface simples com meio saturado de argamassa de cal aérea e seco de tijolo e de provetes mistos com meio inferior em argamassa de cal aérea e tijolo (evolução da coluna de água em função do tempo)

6.5.2 Capilaridade com materiais idênticos

Tijolo

O ensaio realizado sobre o tijolo registou um coeficiente de absorção capilar de $0,058 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ contudo, ao contrário dos ensaios anteriores, não se observou a formação de uma linha de água. Como se pode observar pela Figura 6.52, o coeficiente de absorção capilar a partir do instante $114 \text{ s}^{1/2}$ é semelhante ao obtido para a argamassa de cal aérea nos ensaios mistos com o meio inferior em tijolo. O mesmo resultado pode ser observado ao analisar a evolução da coluna de água em função do tempo na figura 6.53 com uma sorptividade de $0,00017 \text{ m/s}^{1/2}$.

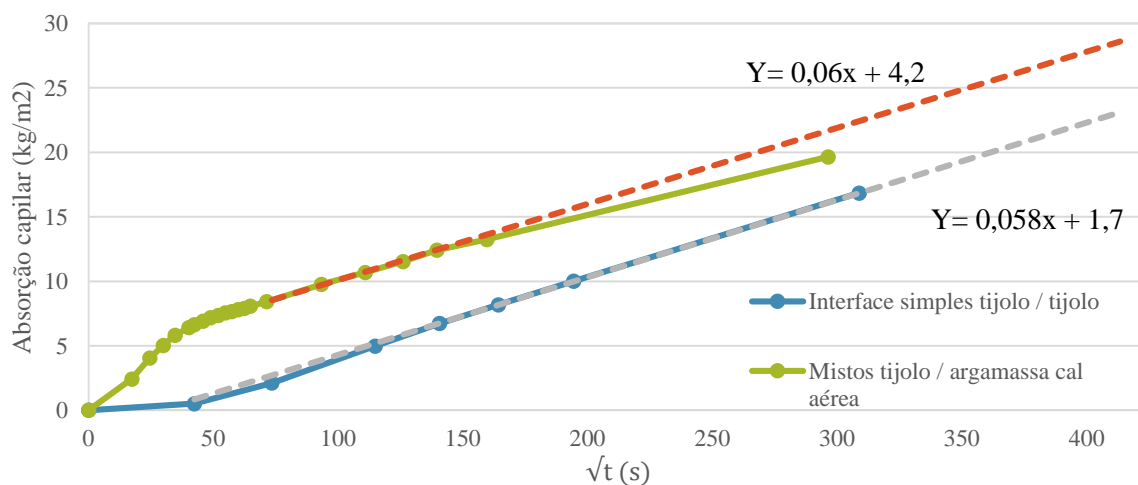


Figura 6.52: Curvas de absorção capilar em provetes mistos com interface simples com materiais idênticos de argamassa de tijolo e de provetes mistos com o meio inferior em tijolo e argamassa de cal aérea (massa de água absorvida por unidade de área em função do tempo)

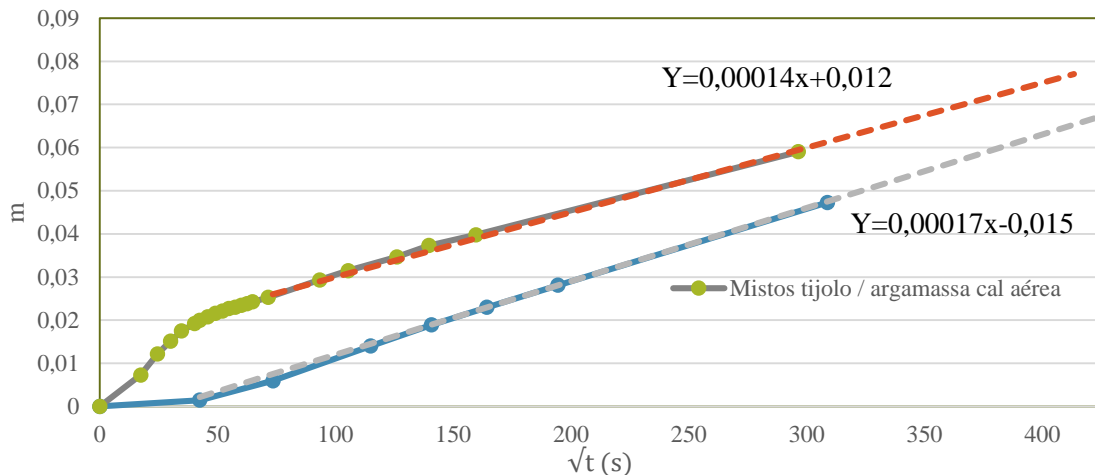


Figura 6.53: Curvas de absorção capilar em provetes mistos com interface simples com materiais idênticos de argamassa de tijolo e de provetes mistos com o meio inferior em tijolo e argamassa de cal aérea (evolução da coluna de água em função do tempo)

Calcário amarelo

Dadas as características do calcário amarelo, não foi possível recriar uma superfície suficientemente lisa na qual o material pudesse encostar com o meio saturado, impossibilitando assim a transferência de água por capilaridade.

6.5.3 Discussão dos ensaios de capilaridade com interface simples

Do presente ensaio foi possível retirar conclusões que não só vêm fundamentar as conclusões da sub-seção 6.4.3, como apresentar desenvolvimentos face à influência do interface no fenómeno da capilaridade.

Quando o meio saturado era argamassa de cal aérea, observou-se um comportamento para cada material seco ao ser colocado sobre esta, semelhante ao dos ensaios mistos com o meio inferior em argamassa de cal aérea e também ao de cada material ensaiado isoladamente. Deste modo, provou-se que o tipo de interface não influencia o comportamento capilar. Freitas [15] aponta para um comportamento diferenciado consoante o tipo de interface que se obtenha, sendo que o único caso em que se conseguiria conservar a capilaridade seria no caso da continuidade hidráulica, uma vez que só nesse caso a continuidade da pressão capilar estaria assegurada. Contudo, o presente ensaio aponta que, independentemente do tipo de interface a absorção capilar não é afectada desde que sejam cumpridas algumas condições:

- o meio inferior tem de estar completamente saturado
- tem de haver contacto entre as faces
- diâmetro dos poros do meio seco tem de ser superior a $0,1\mu\text{m}$

Caso não se verifique a primeira condição, não há garantia de que a água tenha atingido a zona do interface o que impossibilitaria a transmissão de água para o meio seco e uma correcta determinação dos valores de absorção capilar. A segunda condição resulta do facto de se não houver contacto entre os poros dos materiais, os poros do meio seco não conseguem gerar pressão capilar. A última condição parte de uma condicionante física, uma vez que a capilaridade não se processa para diâmetros abaixo de $0,1\mu\text{m}$ [1].

Contudo, observou-se no caso dos ensaios com os meios idênticos, que o tijolo viu o seu coeficiente de absorção capilar atingir um valor semelhante àquele que foi obtido para os ensaios em que o meio saturado era o tijolo e o seco a argamassa de cal aérea. Tal aconteceu pois neste ensaio ao contrário dos anteriores não se formou uma linha de água entre os materiais impossibilitando o livre fornecimento de água à amostra seca.

6.6 Ensaio de capilaridade em sentido horizontal

Calcário Amarelo

O valor do coeficiente de absorção capilar do calcário amarelo determinado no presente ensaio foi de $0,025 \text{ kg/m}^2.\text{s}^{1/2}$. Isoladamente, as mesmas amostras registaram um coeficiente de $0,018 \text{ kg/m}^2.\text{s}^{1/2}$ e nos ensaios de capilaridade em provetes mistos com o meio inferior em argamassa de cal aérea um coeficiente de absorção capilar de $0,015 \text{ kg/m}^2.\text{s}^{1/2}$ o que corresponde a uma diferença de cerca de 40% no primeiro caso e de cerca de 63% no segundo. Para diferenciar os coeficientes de absorção capilar traçaram-se na Figura 6.54 tangentes às curvas dos ensaios em sentido horizontal e dos ensaios em provetes mistos.

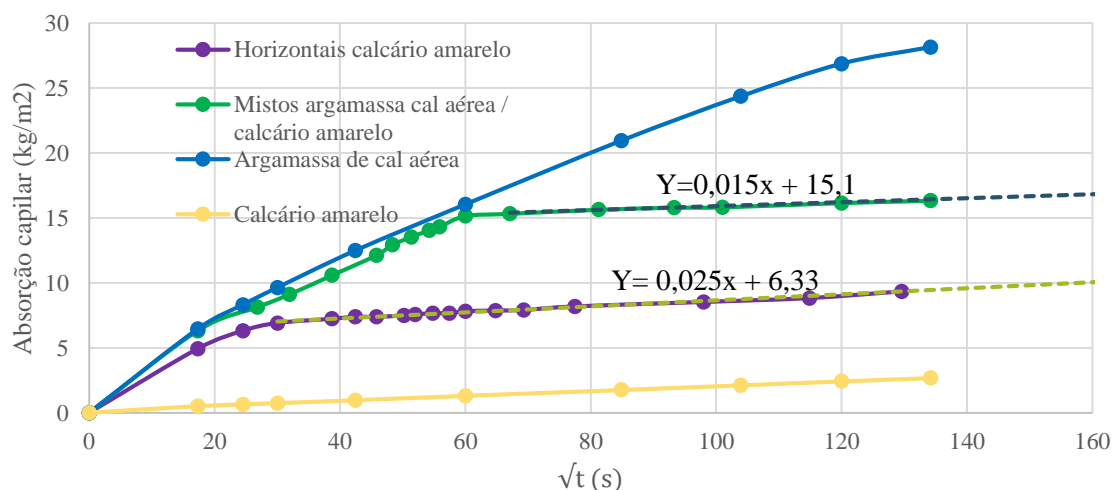


Figura 6.54: Curvas de absorção capilar dos ensaios de capilaridade horizontais do calcário amarelo, dos ensaios mistos com meio inferior em argamassa e calcário amarelo e da argamassa de cal aérea

Granito

O ensaio de absorção capilar em sentido horizontal realizado sobre o granito revelou um período inicial com um comportamento semelhante ao da argamassa de cal aérea, seguindo-se uma estabilização para um valor superior ao do granito isoladamente, mas inferior ao da argamassa. Este comportamento pode ser visualizado na figura 6.55 registando o ensaio de capilaridade em sentido horizontal um coeficiente de absorção capilar de $0,044 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ face a um coeficiente de $0,035 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ do ensaio de capilaridade do granito isoladamente, o que representa uma diferença de 40%.

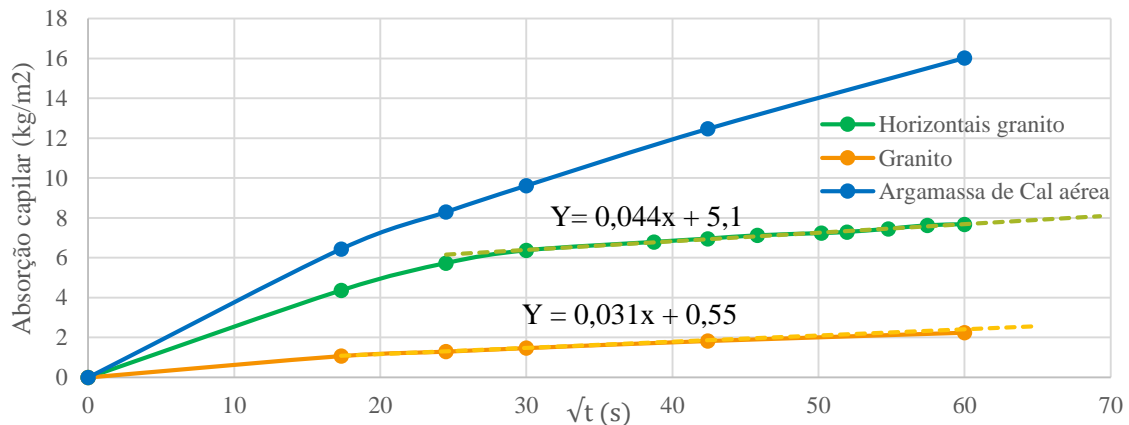


Figura 6.55: Curvas de absorção capilar de ensaios de capilaridade horizontais de granito e dos materiais em separado

6.6.1 Discussão dos ensaios de capilaridade em sentido horizontal

Durante os ensaios de capilaridade em sentido horizontal observou-se uma redução do coeficiente de absorção capilar face aos ensaios do material isoladamente em cerca de 40% e um acréscimo da sorptividade no calcário amarelo mas uma redução no granito. Para compreender este fenómeno é necessário ter em conta que a ascensão capilar decorre da existência de um diferencial de pressão que promove a ascensão da água até que se atinja um equilíbrio entre as pressões que motivam a ascensão e o peso da coluna de água [25]. Assim, quanto maior a altura da coluna de água maior terá de ser a pressão necessária para a elevar.

A figura 6.56 a) ilustra um provete dos ensaios de capilaridade dos materiais isoladamente, a figura b) ilustra um provete dos ensaios de capilaridade mistos com o meio inferior em argamassa e Figura 6.56 c) ilustra um provete do ensaio de capilaridade horizontal.

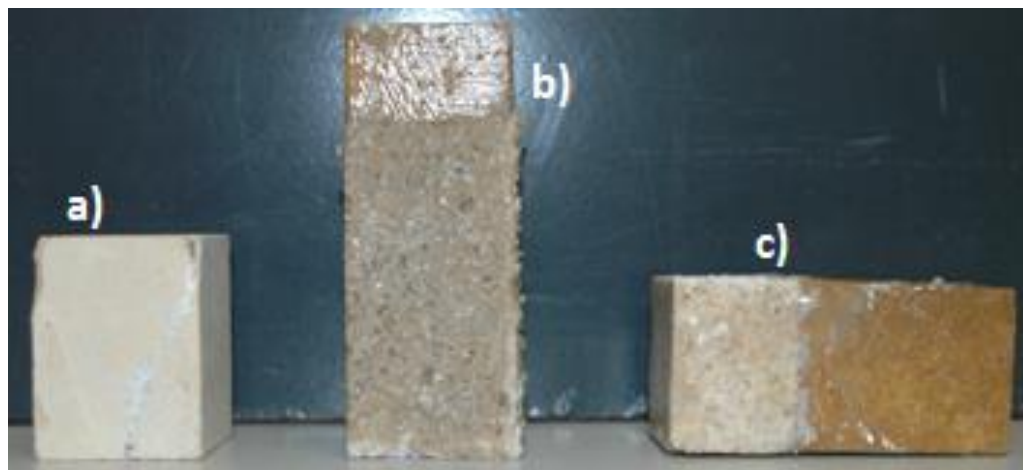


Figura 6.56: a) provetes de ensaio de absorção capilar do material isoladamente, b) provete dos ensaios mistos com o meio inferior em argamassa c) provete de ensaios de capilaridade em sentido horizontal

O ensaio de capilaridade horizontal é de entre todos aquele cuja altura é menor e como tal também a altura da coluna de água é menor. Deste modo, o somatório entre a pressão capilar e o peso da coluna de água resulta num maior valor de sucção face aos restantes, justificando-se o coeficiente de absorção capilar ser superior neste ensaio.

Para determinar a sorptividade do material em sentido horizontal, foi adoptada a expressão 3.20 resultando nos valores apresentados na tabela 6.5 Sendo as respectivas curvas descritas na Figura 6.57. Na mesma figura são apresentadas as amostras de cada material quando analisado isoladamente. O facto de a sorptividade ter reduzido no ensaio com granito pode resultar do facto das amostras estarem extremamente alteradas não se obtendo resultados regulares.

Tabela 6.5: Sorptividade dos materiais no ensaio de capilaridade em sentido horizontal

Material	Sorptividade ($m/s^{1/2}$) ensaio em sentido horizontal	Sorptividade ($m/s^{1/2}$) materiais isolados
Calcário amarelo	0,00024	0,00018
Granito	0,00044	0,00058

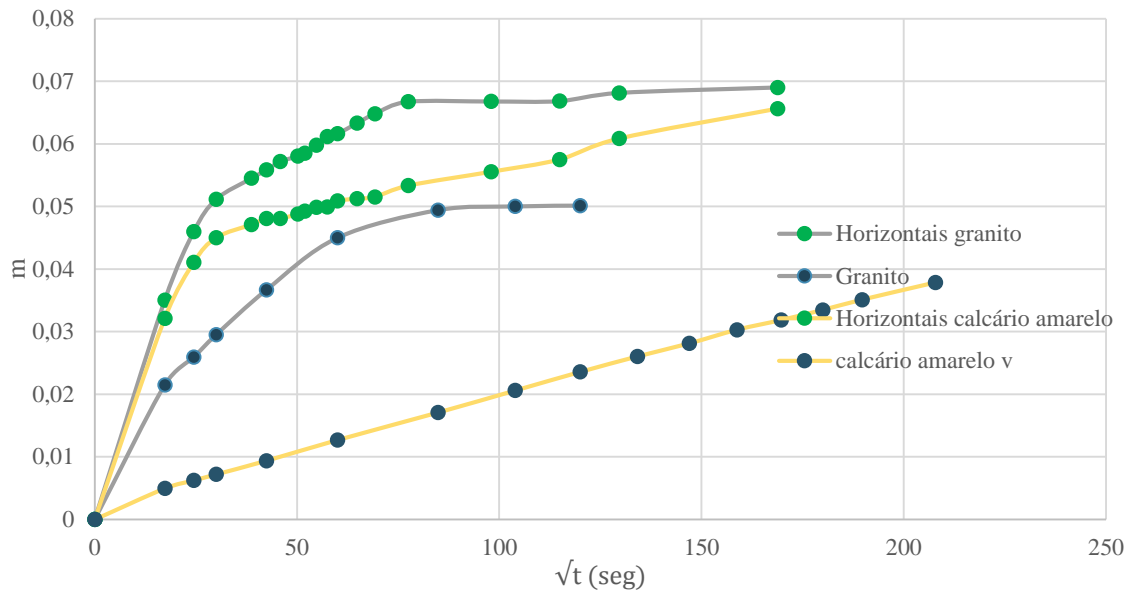


Figura 6.57: ensaios de capilaridade do granito e do calcário amarelo em sentido horizontal e ensaios isoladamente

6.7 Ensaio de ciclos de absorção de água por capilaridade para diferentes teores de água

Apenas foram analisadas as amostras de tijolo e de calcário amarelo. Optou-se por esta abordagem, pois o granito apresenta inúmeras fendas o que tornava impossível o controle da ascensão quando em contacto com a água.

Calcário amarelo

O ensaio realizado sobre o calcário amarelo consta da Figura 6.58. O ponto (0,0) corresponde ao teor inicial de água em cada ensaio para o instante zero definido na tabela 5.5. O comprimento das curvas varia pois para atingir cada teor de água final estabelecido na tabela 5.5 o tempo necessário é variável.

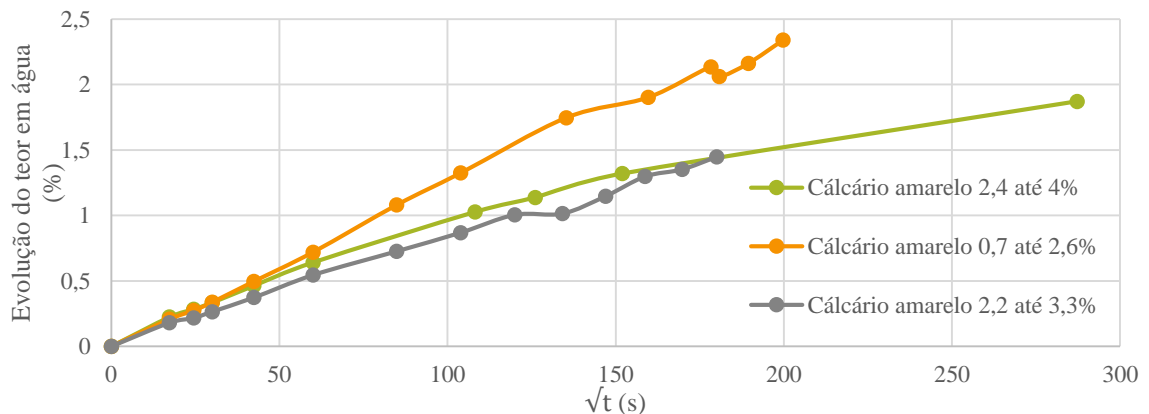


Figura 6.58: Curvas de absorção capilar do calcário amarelo para diferentes teores de água

Tijolo

Tal como no ensaio anterior, na figura 6.59 onde se apresenta o comportamento do tijolo, o ponto (0,0) corresponde ao teor inicial de água em cada ensaio para o instante zero definido na tabela 5.5, variando o comprimento das curvas pois para o material atingir os teores em água finais estabelecidos na tabela 5.5 o tempo necessário é variável.

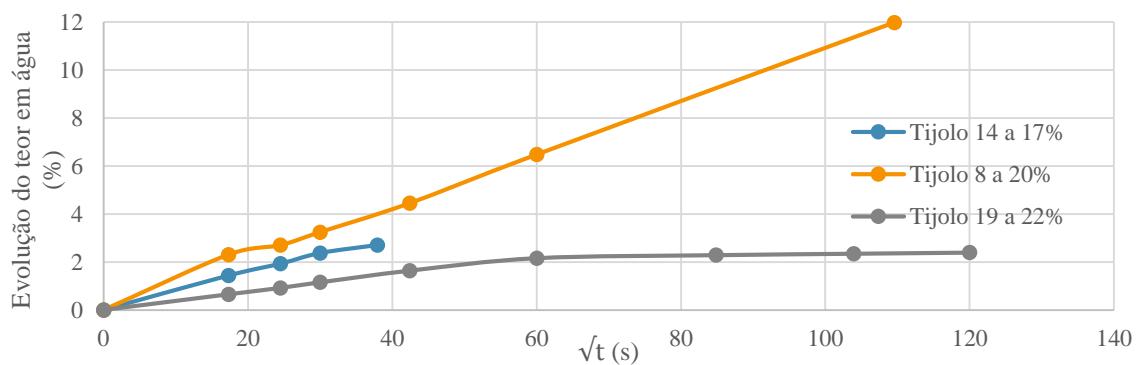


Figura 6.59: Curvas de absorção capilar do tijolo para diferentes teores de água

6.7.1 Discussão dos ensaios de ciclos de absorção de água por capilaridade para diferentes teores de água

Após vários ciclos de absorção capilar para diferentes teores de água iniciais e finais constatou-se que independentemente do material, o coeficiente de absorção capilar diminuía quanto maior fosse o teor de água inicial da amostra.

Para que se compreendam esses resultados é necessário analisar o fenómeno a uma escala menor. Ao fornecer em diversos ciclos uma determinada quantidade de água a um material e cessando-se em seguida este fornecimento, o capilar fica com camadas de ar e água alternadas deslocando-se a água no sentido das maiores sucções, isto é, para zonas com poros de menor diâmetro [17]. Deste modo, o capilar ficará com um preenchimento como ilustrado na Figura 6.60.



Figura 6.60: Alternância de camadas de ar e de água num capilar após ciclos de fornecimento e cessação de água

Quando a amostra for novamente colocada em contacto com água, a capacidade que o material terá para absorver água será inferior, não só devido às bolsas de ar que ocupam espaço, como ao facto de pequenos volumes residuais de vapor de água se formarem e se deslocarem no material impedindo o acesso de água a essas zonas [38]. Para além deste fenómeno as forças actuantes são diferentes tal como ilustra a figura 6.61.

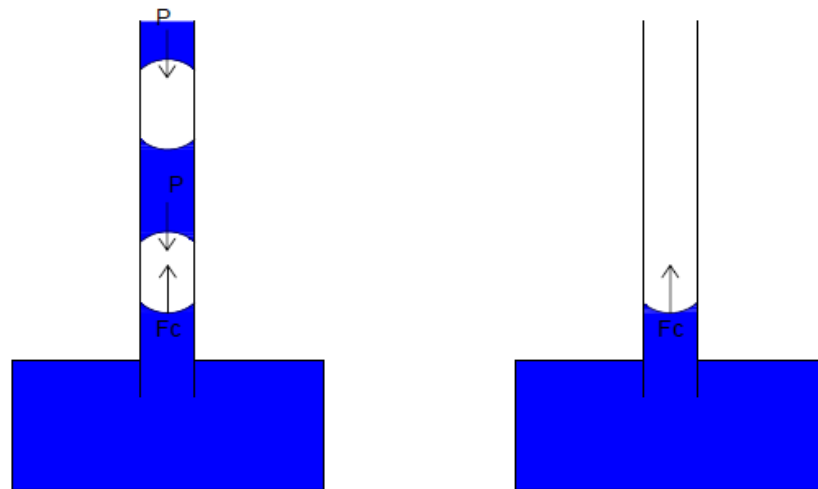


Figura 6.61: Capilares com bolsas de ar-água e capilar sem bolsas de água e ar-água

A imagem da esquerda ilustra a situação do presente ensaio em que a força capilar é contrariada pelo peso da massa de água que se encontra em cima. À direita está o caso corrente dos ensaios de capilaridade em que a amostra se encontra totalmente seca. Assim, quanto maior o teor em água, maior será a altura da coluna de água intercalada com ar no instante zero do ensaio e consequentemente maior a massa de água no capilar. Visto que a capilaridade se processa até que se atinja um equilíbrio entre as pressões que motivam a ascensão e o peso da coluna de água [25], como a pressão não altera e a massa é maior quanto maior o teor de água, a absorção capilar resultante é menor.

7 Conclusões e propostas para desenvolvimentos futuros

7.1 Conclusões

Através da análise dos resultados deste trabalho foi possível chegar à conclusão que quando se dá a transmissão de água por capilaridade entre dois materiais esta depende essencialmente da gama de poros entre os materiais. Esta diferença irá determinar se a absorção capilar aumenta, diminui ou se mantém constante. Para que a ascensão capilar aumente é necessário que o material seco tenha uma porosidade igual ou superior e que o diâmetro dos poros seja inferior ao material que se encontre saturado. Ainda que o material seco tenha uma maior porosidade, se o diâmetro dos poros for superior então a absorção capilar reduz ou caso tenha poros de pequenas dimensões em quantidade suficiente mantém-se constante. O factor que justifica este comportamento resulta das pressões que cada poro gera, sendo que quanto mais estreito for o poro maiores serão as pressões geradas. Contudo, o poro nunca poderá ter um diâmetro inferior a $0,1\mu\text{m}$ pois abaixo deste valor a capilaridade deixa de se processar.

Constatou-se também, que o tipo de interface não influencia a transmissão de água entre os dois materiais desde que o material que se encontre saturado esteja totalmente saturado e haja um contacto entre as superfícies. Nesta situação, a absorção capilar que se regista é o mesmo para interfaces de contacto simples entre as superfícies, ou dos provetes produzidos como no sub-capítulo 5.8. No primeiro caso a superfície de contacto apresenta espaços de ar, alternados com zonas de contacto e no segundo caso há um contacto maior entre as superfícies, proporcionado pela argamassa como se ilustra na figura 3.5, excepto em pequenas zonas onde se formaram por bolhas de ar. coefici No presente trabalho fez-se uma adaptação aos ensaio de capilaridade, permitindo analisar a absorção capilar de um material em sentido horizontal como apresentado no sub-capítulo 5.11.4, confirmando-se desse modo que o efeito da gravidade influencia a ascensão capilar, na medida em que nestes ensaios se registaram diferenças de cerca de 40% no coeficiente de absorção capilar face aos ensaios sobre os materiais isoladamente, quando a diferença de alturas foi de apenas 1cm.

Adicionalmente, pode-se ainda concluir que rapidez com que a água evolui nos materiais também depende directamente dos poros na medida em que tal como apresentado por Rato [25] os poros de maiores dimensões são primeiramente preenchidos e só em seguida são preenchidos os de menores dimensões, assim quanto maior a quantidade de poros de grandes dimensões maior será a evolução da água no material, sendo o inverso também ele válido.

7.2 Propostas para desenvolvimentos futuros

Para desenvolvimentos futuros, propõe-se no seguimento deste trabalho, a realização de ensaios de capilaridade sobre provetes mistos de materiais com diferentes gamas de diâmetros capilares e de porosidade aberta, permitindo deste modo descrever com maior detalhe a relação que existe entre a variação de diâmetros capilares e o fenómeno capilar no interface entre dois materiais nomeadamente:

1. a combinação de um material com poros de reduzido diâmetro mas superiores a $0,1\mu\text{m}$ com um material cuja gama de poros seja de diâmetros elevados mas com porosidade aberta semelhante.
2. a combinação de dois materiais com porometria semelhantes.

Com base na teoria apresentada na presente dissertação as combinações referidas pretendem confirmar duas hipóteses:

- na primeira combinação, se o material em contacto com a água fosse o de reduzido diâmetro, a quando a água chegasse ao interface, o material superior não conseguiria gerar pressão capilar suficiente para absorver água através do meio inferior e consequentemente o coeficiente de absorção capilar seria quase nulo.
- na segunda combinação, as pressões capilares devem ser semelhantes e como tal não se registaria uma alteração da absorção capilar independentemente do material em contacto com a água.

Propõe-se o estudo da capilaridade sobre provetes mistos com terra moldada confinada com resina. Deste modo não só se consegue aproximar os ensaios do que acontece nas paredes de alvenaria onde haja contacto com terra, como também verificar se os finos migram para os materiais, obstruindo os poros e alterando desta forma o coeficiente de absorção capilar.

Por último propõe-se a realização de ensaios de capilaridade após diversos ciclos de humedecimento e de secagem, para confirmar a teoria de Li Dejan [21], que aponta para uma alteração da porometria dos materiais e do coeficiente de absorção capilar.

Bibliografia

- [1] CHAROLA, A. E. – *Study of hydrated cement pastes of aged concretes from Acropolis monuments. In Mortars, Cements and grouts used in the conservation of historic buildings*. Roma: International Center for the study of preservation and the restoration of cultural property (ICCROM), 1982
- [2] CNUDE, V. *et al.* – *Porosity and microstructure characterization of building stones and concretes*. Engineering Geology pags.76-83. Elsevier, Julho 2008
- [3] COLLET, F. *et al.* - *Porous structure and water vapour sorption of hemp-based materials*. Construction and Building Materials, Volume 22, nº 6, pags.1271 – 1280, Junho 2008
- [4] CORREIA, J. – *Avaliação da higroscopicidade de materiais correntes* – Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia civil, FCT-UNL, Junho 2013
- [5] COUTINHO, A. S. - *Fabrico e propriedades do betão*. Volumes I, II e III. 3ªedição. Lisboa, LNEC, 1997
- [6] CROCI, G. - *The conservation and structural restoration of architectural heritage*. Computational Mechanics, Southampton, 1998
- [7] DIONISIO, A. - *A Pedra de Ançã: Características Mineroquímicas e Petrofísicas* - Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Georrecursos, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 1997
- [8] DRYSDALE, R. *et al.* – *Behavior and Design of masonry walls*. The Masonry Society, Boulder (Colorado), 1999
- [9] DULLIEN, F. A. L. *et al.* - *Porous media- Fluid transport and pore structure*. New York Academic Press, 1979.
- [10] DEC/UNL – *Pedras naturais e artificiais. Determinação da massa volúmica*. Fichas de ensaio: Fe 01, Caparica, FCT/UNL, 1996
- [11] DEC/UNL - *Pedras naturais e artificiais. Determinação da porosidade aberta*. Fichas de ensaio: Fe 02, Caparica, FCT/UNL, 1996
- [12] DEC/UNL – *Pedras naturais e artificiais. Determinação do coeficiente de absorção capilar*. Fichas de ensaio: Fe 06, Caparica, FCT/UNL, 1996

- [13] FELGUEIRAS, N. - *Avaliação da evolução das características de argamassas de cal aérea com diferentes teores de metacaulino, sujeitas a ambientes de diferente humidade relativa* – Dissertação para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil. FCT/UNL, Novembro 2011
- [14] FITZNER, B. – *Porosity properties and weathering behaviour of natural stones- Methodology and examples in stone material monuments: Diagnosis and conservation- Second course*. C.U.M. University School of Monument Conservation. Bari: Mario Adda Editore, 1994
- [15] FREITAS, V. P. *et al.* - *Moisture migration in building walls – Analysis of the interface phenomena*. Building Environment 31, pags.99-108. Elsevier, Março 1995
- [16] HAMRAUI, A. and NYLANDER, T. - *Analytical Approach for the Lucas–Washburn Equation*. J. Colloid and Interface Sci., 250, pags. 415–421, Maio 2002
- [17] HENRIQUES, F. – *Comportamento Higrotérmico de edifícios*. Lisboa, FCT/UNL, 2011
- [18] HENRIQUES, F. - *Humidade em paredes*. Lisboa, LNEC, 2007.
- [19] HU, Q. *et al.* – *Low pore connectivity in natural rock*. Journal of Contaminant Hydrology - Elsevier, 133, pags.76-83, Março 2012
- [20] LAGO, M; ARAUJO, M. – *Capillary rise in porous media*. Journal of colloid and interface science 234, pags.35-43, Academic Press, 2001
- [21] LI, D. *et al.* - *Analysis of microscopic pore structure of rocks before and after water absorption*. Mining Science and Technology, 21, pags.287-293, Elsevier, Novembro 2010.
- [22] Mecânica das Alvenarias; Folhas de apoio da disciplina de Reabilitação de Edifícios, 2013-2014
- [23] MEHTA, P. K., MANMOHAN, D. – *Pore size distribution and permeability of harden cement pastes*. Seventh International Congress on Chemistry of Cement, Vol3 pags. 1-5, Paris Editions Sptima, Paris, 1980
- [24] OLIVEIRA, C. ; CABRITA. A. - *Tipificação do parque habitacional*. Lisboa, LNEC, 1985
- [25] OR D., TULLER M. – *Capillarity. Reference module in earth systems and environmental sciences*, pags. 155-164, Elsevier, 2005
- [26] POPOVICS, S. – *Concrete materials – Properties specifications and testing*. 2ª edição. New Jersey: Noyes publications, 1992.

-
- [27] RATO, V. – *Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas* – Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil. FCT/UNL, Lisboa 2006
- [28] REDDY, B. *et al.* - *Influence of sand grading on the characteristics. Analysis of mortars and soil-cement block masonry*. Construction and Building Materials, 22, pags.1614-1623. Elsevier, 2007
- [29] RIGBY S. *et al.* - Interpreting mercury porosimetry data for catalyst supports using semi-empirical alternatives to the Washburn equation. Applied catalysis, vol 238, pags. 303-318, 2003
- [30] RIRSCH, E. ; ZHANG Z. – *Rising damp in masonry walls and the importance of mortars properties*. Construction and Building Materials, pags.1815-1820, Elsevier, Abril 2010
- [31] F.G. Yost. *et al.* - *The flow of liquids in surface grooves*. Acta materialia, Volume 45, pags.5337-5345, Elsevier, 1997
- [32] SEGURADO, J. - *Alvenaria e Cantaria*. 4ª Edição. Bertrand, Lisboa
- [33] SIEBOLD, A. *et al.* – *Effect of dynamic contact angle on capillary rise phenomena. Colloids and surfaces*. A physicochemical Eng. Aspects, vol 161, pags.81-87. Elsevier, 2001
- [34] SILVA, L. - *Análise técnico financeira de paredes exteriores de panos simples*. Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil, IST, Setembro 2007
- [35] STEFANIOU, M - *Methods for porosity measurement in lime-based mortars*, Construction and Building Materials, vol 24, pags. 2572–2578, Junho 2010
- [36] TAUFFER, D., AHARONY, A. - *Introduction to Percolation Theory*, 2nd ed. Taylor and Francis, London, 1994
- [37] VENUDE, C. *et al.* - *Porosity and microstructure characterization of buildings stones and concretes* Engineering and Geology, pags. 76-83 Elsevier, Julho 2008
- [38] VERBECK, G. – *Pore structure - significant tests of properties of concrete and concrete aggregates*. ASTM Special Technical Publication, vol 169, pags. 136-142, Elsevier, 1965
- [39] CEREPÍ A. *et al.* - *The dynamics of capillary flow and transport properties porous media by time-controlled porosimetry*. Physicochemical and Engineering Aspects, vol 206 pags. 425-444, Elsevier, Julho 2002

- [40] WEB, P. - *An Introduction To The Physical Characterization of Materials by Mercury Intrusion Porosimetry with Emphasis On Reduction And Presentation of Experimental Data*. Georgia, Janeiro 2001
- [41] YOUNG, W. – *Analysis of capillary flows in non-uniform cross sectional capillaries*. *Colloids and surfaces*. A Physicochemical Eng. Aspect, vol 234, pags.123-128, Elsevier, 2004

Bibliografia On-line

- [42] <http://15wceesslatin.blogspot.pt/2012/09/construcao-pombalina-patrimonio.html>; (22/07/2014)
- [43] <http://camaramunicipaldecastelobranco.pt/pt/ms/ms/cultura-6000-458-castelo-branco/ms-90051152-p-2/> ; (01/08/2014)
- [44] <http://geomuseu.ist.utl.pt/MINGEO2011/Aulas%20teoricas/Tema%2008%20Geomorfologia%20Modelados/NORMAL.pdf>; (03/07/2014)
- [45] <http://www.ebah.com.br/content/ABAAABJccAD/agrominerais-calcario-dolomito> ; (12/08/2014)

